

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE MADRID**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR**



## **PROYECTO FIN DE CARRERA**

**Algoritmos de planificación para redes elásticas.**

**Arturo Mayoral López de Lerma**

**Julio de 2013**



# **Algoritmos de planificación para redes elásticas.**

**AUTOR: Arturo Mayoral López de Lerma**

**TUTOR: Víctor López Álvarez**

**PONENTE: Jorge López de Vergara**

**Dpto. Tecnología Electrónica y de las Comunicaciones**

**Escuela Politécnica Superior**

**Universidad Autónoma de Madrid**

**Julio de 2013**



## ***Resumen***

El continuo aumento de la demanda de tráfico en la red y la aparición de nuevos paradigmas en el uso de servicios de internet, como el video bajo demanda, han movido a la industria de los operadores de red a buscar nuevas soluciones para aumentar la capacidad y añadir mayor flexibilidad a sus tramos de red de transporte óptico.

La tecnología de transmisión más extendida en las redes ópticas es la multiplexación por longitud de onda (WDM). Esta tecnología se basa en la transmisión de canales ópticos sobre una misma fibra de igual ancho de banda sobre una rejilla espectral fija establecida por la ITU-T (*Coarse Wavelength Division Multiplexing* - CWDM ó *Dense Wavelength Division Multiplexing* - DWDM). Este enfoque en la transmisión de canales de ancho de banda fijo restringe la capacidad de la red a adaptarse a las necesidades reales de transmisión, y la posibilidad de seguir creciendo en capacidad en la transmisión de largas distancias (*long haul*).

Recientemente, investigadores del sector, han ideado un nuevo enfoque para la evolución de las redes basadas en DWDM sobre rejilla fija hacia una nueva rejilla flexible. Dicho enfoque ha sido denominado Flexgrid o redes ópticas elásticas. Recientemente grupos del IETF están comenzando a desarrollar tareas de normalización y de extensión de las funcionalidades del plano de control GMPLS para incorporar este nuevo concepto.

En este proyecto se va a llevar a cabo un estudio exhaustivo del concepto de las redes elásticas desde el plano de datos hasta el plano de control. Se va a llevar a cabo la implementación, sobre un elemento de cálculo y optimización de rutas en la red, denominado "*Path Computation Element*" (PCE), de algoritmos capaces de generar dichas rutas sobre las redes elásticas. Y por último, se realizarán estudios comparando el rendimiento de las redes WDM actuales con las redes elásticas, para obtener y cuantificar los beneficios de las últimas, en términos de capacidad y flexibilidad.

## ***Palabras Clave***

Redes ópticas elásticas, Flexgrid, OFDM, PCE, algoritmos de planificación "*Routing and Spectrum Allocation* (RSA)", GMPLS, redes de transporte.



## ***Abstract***

There is widely accepted by the network operators, market analysts and all parts from the telecommunications industry, the traffic in the backbone networks is dramatically increasing every year. Some factors in this increment of the bandwidth demand are the impact of the services such as video on demand (VoD) or the high success of the smartphones and mobile applications.

Nowadays, the most extended transmission technology in the optical transport networks is dense wavelength division multiplexing (DWDM). It allows high speed transmission over long distances and it is the technology used by most operators to interconnect their central IP core routers over a photonic mesh. However, this transmission technology establishes a fixed channel spacing of 50 or 100GHz, established by the ITU-T. This rigid frequency grid avoids a more accuracy on the spectrum consume, and the transmission of high speed channels over long distances.

Recently, many researchers has put their interest on a new concept of optical transmission, called elastic optical network or Flexgrid. This is the evolution of the DWDM over a fixed grid to a new flexible optical grid where the bandwidth of the channels will not be limited. An IETF task force is already working in the normalization process of this new concept called Flexgrid or Flexi-grid, and in the extension of the control plane protocols as GMPLS to implement it in real networks.

In this project, it is going to be done an exhaustive research of the elastic optical networks concept and all the elements involved from data plane to control plane. Algorithms for routing and spectrum allocation over elastic optical networks are going to be implemented in a centralized network optimizer element called Path Computation Element (PCE). Finally, it will be carried out different studies comparing DWDM and Flexgrid implementations to obtain and quantify the benefits of this new network architecture.

## ***Key Words***

Elastic Optical Networks, Flexgrid, OFDM, PCE, “*Routing and Spectrum Allocation* (RSA)”, GMPLS, Optical Transport Networks (OTN).





## *Agradecimientos*

En primer lugar quiero dar las gracias a mis padres, Carlos y Raquel, por el excepcional trabajo que han realizado educándome todos estos años, y para poder proporcionarme la posibilidad de llevar a cabo unos estudios superiores que me permitan el día de mañana poder ganarme la vida y sobre todo conocer y entender el mundo con todas las armas que proporciona el conocimiento. Por todo esto y muchísimas otras cosas que no se pueden expresar en unas pocas líneas, gracias.

Quiero dar las gracias también, por haber podido desarrollar toda mi educación en instituciones públicas, financiadas con los impuestos de los ciudadanos de este país. Doy gracias a todos aquellos que trabajan por que este modelo siga triunfando y generando profesionales de gran calidad para la sociedad en la que vivimos. Más que nunca ahora, quiero desde aquí realizar una defensa total y sin fisuras del modelo de educación pública que permite a cualquier niño desde su más temprana infancia hasta su plenitud intelectual poder desarrollarse académicamente sin importar su clase social o las posibilidades económicas de su familia.

No me puedo olvidar de todas esas personas que me han acompañado durante estos maravillosos años en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Autónoma de Madrid. A Pablo, Tomas, Carlos y el resto de gente con la que he compartido grupos de prácticas, horas de biblioteca y ratos de descanso en la cafetería o en el césped. Gracias también a mis amigos de mi año de Erasmus en Suecia (Rubén, Edu y Javi) por haber compartido residencia, profesión, y porque a día de hoy todavía somos buenos amigos y seguimos compartiendo buenos ratos por Madrid.

A mis amigos de la infancia y juventud (Ricardo, Javi, Jose Ramón, Nacho, Pablo, Rus, Zanita, Cantero, Abu, Trillo, Carlos...) gracias también porque sin vuestro apoyo y amistad no sería la persona que soy hoy y hubiera podido soportar toda la presión que supone en algunos momentos hacer una carrera como esta. A ti Laura también, por haberme hecho crecer tanto como persona, por haber confiado siempre en mí y por ser quien eres en mi vida, gracias.

Por último, pero no menos importante quiero dar las gracias a mi tutor Víctor y a mis compañeros en Telefónica I+D (Marta, Sergio, Oscar, Fer, Juan...) por haberme ayudado mucho con mi Proyecto de Fin de Carrera y por haberme enseñado tantas cosas de este mundillo que son las Redes de Telecomunicación.

A todos, y a los que se me olvidan, GRACIAS.



# INDICE DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1	Motivación .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Organización de la memoria .....	2
2	Redes de transporte basadas en conmutación óptica. ....	5
2.1	Plano de datos: Redes Ópticas Elásticas.....	5
2.1.1	Concepto de Redes Ópticas Elásticas y Flexgrid .....	6
2.1.2	Sistemas de transmisión para redes ópticas elásticas .....	8
2.1.3	Arquitectura y tecnologías de transmisión para las redes elásticas.....	14
2.1.4	Conmutación óptica flexible .....	17
2.1.5	Recepción óptica .....	21
2.2	Plano de Control para redes Ópticas Elásticas. ....	24
2.2.1	GMPLS .....	24
2.2.2	PCE.....	31
3	Algoritmos de planificación para redes elásticas.....	37
3.1	Algoritmos Routing & Spectrum Allocation (RSA) .....	37
3.1.1	Offline RSA. ....	37
3.1.2	Online RSA .....	40
3.2	Algoritmos RSA para tráfico variable en el tiempo. ....	41
3.3	RSA for Survivable Networks.....	43
3.4	Algoritmos RSA adaptativos a la distancia.....	44
3.5	De-fragmentación de red y re-asignación del espectro.....	46
3.6	Traffic Grooming.....	49
3.7	Resumen de algoritmos del Estado del Arte .....	50
4	Diseño de algoritmos de planificación para redes elásticas .....	51
4.1	AURE SSON.....	51
4.2	KSP Channel-based .....	55
4.3	KSP Distance-Adaptive Multifiber Spectrum Assignment (KSP-DA-MSA) .....	57
5	Entorno experimental.....	61
5.1	Extensiones en el plano de control para redes elásticas.....	61
5.2	Entornos de simulación.....	65
6	Evaluación de prestaciones.....	69
6.1	Estudios de planificación estática en redes Elásticas y comparación de rendimiento con redes WDM.....	69
6.1.1	Características y marco general del estudio.....	69
6.1.2	Resultados del estudio. ....	72
6.2	Estudio de migración de una red WSON a una red elástica .....	74
6.2.1	Condiciones iniciales del estudio .....	74
6.2.2	Arquitectura de red.....	76
6.2.3	Modelos de tráfico.....	77
6.2.4	Estrategias de migración.....	80
6.2.5	Resultados de la simulación.....	81
6.3	Comparación de eficiencia de algoritmos.....	83
6.3.1	Marco del estudio .....	84
6.3.2	Resultados .....	85

7 Conclusiones y trabajo futuro.....	89
7.1 Conclusiones .....	89
7.2 Trabajo futuro.....	90
Referencias .....	92
Glosario .....	97
Anexos .....	I
A Manual de uso de la herramienta de planificación: “Network Planning Tool” .....	I
B Publicaciones relacionadas.....	VI
C PRESUPUESTO .....	IX

## INDICE DE FIGURA

Figura 2-1: Ejemplo de asignación de canales en Flexgrid.....	7
Figura 2-2: Ejemplo de asignación de canales en rejilla fija de 50GHz. ....	7
Figura 2-3: Señal OFDM en el dominio a) frecuencial b) temporal.....	10
Figura 2-4: Símbolo OFDM en dominio temporal y frecuencial [57].....	11
Figura 2-5: Diagrama de bloques de un sistema OFDM, transmisor y receptor [12]; (IFFT: <i>Inverse Fast Fourier Transform</i> ; FFT: <i>Fast Fourier Transform</i> ; DAC: Conversor Digital-a-Analógico; ADC: Conversor Analógico-a-Digital; LO: Oscilador Local; IQ: In-phase/Quadrature phase). ....	12
Figura 2-6: Respuesta en frecuencia (drc.) y en el tiempo (izq.) de una señal N-WDM.....	13
Figura 2-7: a) Canales convencionales en redes WDM basadas en rejilla fija de 50 GHz; b) Canales posibles en redes elásticas con ancho de banda variable y distintos formatos de señal. ....	14
Figura 2-8: Variación del ancho de banda o tasa de datos, en función del número de subportadoras componedoras de la señal OFDM [11].....	15
Figura 2-9: Funcionalidades del: a) <i>bandwidth variable transponder</i> (BVT); b) <i>Sliceable bandwidth variable transponder</i> (SBVT)[58].....	16
Figura 2-10: Arquitectura de red elástica. ....	17
Figura 2-11: Arquitectura ROADM simple [27].....	18
Figura 2-12: Esquema funcionamiento de un bandwidth-variable WSS. ....	18
Figura 2-13: Esquema de funcionamiento del filtro óptico basado en la tecnología MEMS [26].....	19
Figura 2-14: Arquitectura ROADM colorless, directionless [27]. ....	20
Figura 2-15: Esquema de detección coherente[59].....	22
Figura 2-16: Esquema de un DSP[62]. ....	24
Figura 2-17: Jerarquía de conmutación GMPLS. ....	26
Figura 2-18: Diagrama de funcionalidades del plano de control GMPLS [49]. ....	28
Figura 2-19: Intercambio de mensajes de señalización RSVP-TE para el establecimiento y liberación de recursos para un LSP[33]. ....	29
Figura 2-20: Generalized Label Object para redes de transporte óptico DWDM [40].....	30
Figura 2-21: Configuraciones integrada y separada del PCE con los elementos de red (PCCs)[38].....	33
Figura 2-22: Intercambio de mensajes en una sesión PCEP. ....	35
Figura 3-1: Diferentes esquemas de asignación del espectro [15]. ....	43
Figura 3-2: a) Ejemplo topología de 6 nodos; b) Asignación espectral de 4 canales de datos de diferentes <i>bitrates</i> en <i>frequency slots</i> de 12.5 GHz en función de las características del <i>path</i> ; c) Representación espectral de diferentes formatos de modulación y bandas de guarda. ....	45
Figura 4-1: AURE pseudo-código .....	52
Figura 4-2: Ejemplo de asignación de espectro a un canal con AURE SSON. ....	54
Figura 4-3: AURE SSON pseudo-código .....	54
Figura 5-1: Emplazamiento del objeto GENERALIZED_BANDWIDTH en la estructura de los objetos <i>Request</i> y <i>Response</i> del protocolo PCEP [52].....	62
Figura 5-2: GENERALIZED_BANDWIDTH PCEPObject. ....	62
Figura 5-3: Captura de tráfico protocolo PCEP.....	63

Figura 5-4: Tipos de objeto RSVP-TE SENDER_TSPEC .....	64
Figura 5-5: Objeto SSON SENDER_TSPEC. ....	64
Figura 5-6: Formato y codificación de la etiqueta para redes ópticas basadas en Flexgrid ( <i>Flexi-label</i> ). ....	65
Figura 5-7: Diagrama simplificado de red emulada con plano de control GMPLS + PCE. ....	67
Figura 6-1:a) Topología Red de Telefónica España .....	70
Figura 6-2: Ganancia de capacidad con Flexgrid y capacidad total enrutada. ....	72
Figura 6-3: Arquitectura ROADM [54]. ....	76
Figura 6-4: Modelo de protección del tráfico. ....	78
Figura 6-5:a) Número de 1x9 WSS para el módulo de conmutación ( <i>Express-switch</i> ), b) número de 1x20 WSS en el módulo Add/Drop. ....	81
Figura 6-6: Numero de nuevas fibras desplegadas cada año del estudio. ....	82
Figura 6-7: Número total de transpondedores divididos por tipo, para cada caso de estudio. ....	83
Figura 6-8: Eficiencia espectral de red (Gbps/GHz), ....	85
Figura 6-9: a) Ocupación espectral, b)Espectro total consumido (THz). ....	86
Figura 6-10: Distribución del tráfico por tipo de conexión para los años: 2013, 2020 y 2027. Distribución para el algoritmo AURE-SSON. ....	87
Anexo A-1: Captura ejecución Network Planning Tool en Eclipse .....	IV
Anexo A-2: Network planning tool. Diagrama de bloques. ....	V

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Comparativa de formatos de señal, ganancia Flexgrid vs Rejilla fija 50GHz.....	8
Tabla 3-1: Recopilatorio de algoritmos del estado del arte RSA. ....	50
Tabla 4-1: Formatos de señal disponibles en el algoritmo adaptativo a la distancia[63][64]. .....	58
Tabla 6-1: Tipos de conexiones, formatos de señal y ganancia del Flexgrid respecto a rejilla fija. ....	71
Tabla 6-2: Ganancia y datos de capacidad total obtenida en Flexgrid y WSON. ....	73
Tabla 6-3: Tipos de conexión y año de disponibilidad[63][64]. ....	75
Tabla 6-4: Resultados del tráfico procesado al final del estudio en el año 2034. ....	79
Tabla 6-5: Formatos de transmisión disponibles para cada algoritmo[63][64].....	84
Tabla C-1: Gastos en recursos Software .....	IX
Tabla C-2: Gastos en recursos Hardware.....	IX
Tabla C-3: Gastos en recursos materiales. ....	X
Tabla C-4: Planificación del proyecto desglosado en tareas.....	XI
Tabla C-5: Planificación del proyecto. Diagrama de Gant. ....	XI
Tabla C-6: Costes Salariales.....	XII
Tabla C-7: Costes de mano de obra. ....	XII
Tabla C-8: Presupuesto de ejecución por contrata. ....	XIII
Tabla C-9: Presupuesto Total. ....	XIII





# 1 Introducción

---

## 1.1 Motivación

El tráfico de datos, que soportan las redes de telecomunicaciones, es cada vez más heterogéneo e impredecible debido al desarrollo de nuevos servicios para el usuario, tales como el video bajo demanda o la telefonía IP, y de la creciente demanda de organizaciones en disponer de redes privadas virtuales (VPNs) para el tráfico de sus “*datacenters*”. Este hecho, junto con el aumento continuo de demanda de tráfico en la red, motiva una creciente preocupación por disponer de una red dinámica y flexible, capaz de adaptarse a los cambios en el flujo de datos y que además ofrezca un rendimiento alto de los medios desplegados.

El núcleo de las redes de transporte están basados en una malla fotónica, en la cual se efectúa conmutación de circuitos mediante multiplexación de longitud de onda (WDM) ofreciendo altas velocidades de transmisión. Sin embargo, la naturaleza de WDM y esta arquitectura, introducen una alta rigidez en la red, causando un bajo rendimiento del ancho de banda disponible y poca flexibilidad a la hora de reconfigurarse en función de las variaciones del tráfico.

Un nuevo concepto en las tecnologías de transporte para redes ópticas son las *Elastic Optical Networks (EONs)* [1]. Tecnologías de transporte con modulación multi-portadora como *Optical-Orthogonal Frequency Division Multiplexing (O-OFDM)*[2] permiten una granularidad más fina, a la hora de crear canales con anchos de banda variables que se adapten mejor a la demanda.

Por último, la introducción de canales con ancho de banda variable introduce una complejidad adicional a la hora del proceso de enrutado, la asignación del espectro disponible. Una nueva familia de algoritmos de planificación por tanto, será necesaria para efectuar el cómputo de las rutas y la asignación del espectro disponible en las fibras.

Dichos algoritmos se implementarán dentro de una arquitectura que incluya un elemento centralizado como el *Path Computation Element (PCE)* [4]. El PCE es un componente de red capaz efectuar el cálculo de rutas a través de la misma. Se utiliza en redes basadas en *Multiprotocol Label Switching – Traffic Engineering (MPLS-TE)* o *Generalized MPLS (GMPLS)* para determinar rutas entre nodos, y permite también ejecutar operaciones de ingeniería de tráfico [6].

Este nuevo conjunto de algoritmos denominado *Routing and Spectrum Allocation (RSA)* [2][3] va a ser el objeto de estudio de este proyecto.

## 1.2 Objetivos

La finalidad de este Proyecto de fin de carrera es la implementación y evaluación de algoritmos de planificación de redes ópticas elásticas en el PCE implementado por Telefónica I+D.

Los objetivos principales son:

- Adaptar los algoritmos de plano de control a la conmutación de caminos ópticos con ancho de banda variable y la reserva de los recursos necesarios para el despliegue de los mismos.
- Estudio exhaustivo del estado del arte de algoritmos de planificación de redes elásticas y de los protocolos involucrados en el proceso de reserva de redes elásticas.
- Implementación de algoritmos RSA para peticiones dinámicas de canales con ancho de banda variable, en redes ópticas *Spectrum Switched Optical Networks* (SSON).
- La medición y evaluación de los resultados obtenidos mediante emulación en distintas topologías de estos algoritmos, en comparación con los datos de rendimiento que ofrezcan los algoritmos actuales en redes no elásticas.

## 1.3 Organización de la memoria

La memoria consta de los siguientes capítulos:

- **Capítulo 2: Redes de transporte basadas en conmutación óptica.** En este capítulo se realizará un estudio en profundidad del estado del arte de los distintos campos en los que están enmarcados las redes ópticas elásticas. Por un lado se detallará el plano de datos, con las distintas tecnologías de transmisión, los componentes de red necesarios para la implementación de dichas redes y por otro lado, se definirá el plano de control para redes elásticas.
- **Capítulo 3: Algoritmos de planificación para redes elásticas.** En este capítulo se revisará exhaustivamente el estado del arte de los algoritmos de planificación para redes ópticas elásticas.
- **Capítulo 4: Diseño de algoritmos.** Descripción de los algoritmos de planificación diseñados e implementados.
- **Capítulo 5: Entorno experimental.** Aquí se explicará el marco (Test-bed) en el que se implementan los algoritmos de planificación. Especialmente las extensiones realizadas en el plano de control para la adaptarlo a los requerimientos de las redes elásticas. En particular se detallarán las modificaciones y extensiones realizadas en el GMPLS y en el componente encargado del cómputo de las rutas, el PCE.

- **Capítulo 6: Evaluación de prestaciones y estudios realizados.** Para concluir, este capítulo recogerá el resultado de las simulaciones/emulaciones donde han sido medidas las prestaciones de los algoritmos desarrollados, los resultados y el marco de los distintos estudios realizados sobre las redes elásticas y la presentación mediante gráficas de los resultados obtenidos
- **Capítulo 7: Conclusión y trabajo futuro.** Aquí se intentará dar una serie de conclusiones globales acerca del concepto de las redes elásticas, sus prestaciones y su implementación, y se propondrá una serie de líneas de investigación por las que continuar con el trabajo realizado aquí.



## 2 Redes de transporte basadas en conmutación óptica.

---

Las redes de transporte de nueva generación se pueden dividir en diferentes planos o capas de red, en función de las distintas tareas a realizar dentro de la red. En general las redes están compuestas por un plano de control, un plano de gestión y un plano de datos. El plano de datos se encarga de la transmisión de los datos de información. Este plano estaría compuesto por los enlaces físicos, por los que se envían los paquetes de datos de los usuarios. El plano de gestión se encarga de diversas tareas entre las que se encuentran la evaluación de la seguridad de la red, la gestión de reportes del estado de red, etc. El plano de control, por último, se encarga de las operaciones de señalización y encaminamiento de la información a través de la red. Más específicamente en el plano de control se engloban las operaciones de intercambio de información entre nodos (routers a nivel IP o *Reconfigurable Optical Add & Drop Multiplexers* - ROADMs a nivel óptico) para el cálculo de rutas, acerca del estado de la red (capacidad disponible de los enlaces) y monitorización ante posibles fallos, “caídas” de enlaces, fallos en los nodos, etc.

### 2.1 Plano de datos: Redes Ópticas Elásticas

El interés por las redes elásticas viene motivado principalmente por el continuo aumento del tráfico en la red y la necesidad de los operadores de aumentar la capacidad y el rendimiento de los tramos centrales de sus redes de transporte. La demanda tráfico continúa creciendo. La transmisión óptica a 10 Gbps está ampliamente desplegada y algunos operadores de red (*Service Providers* - SP) ya están comenzando a instalar tecnologías con tasa de datos a 40 Gbps e incluso a 100 Gbps en una misma longitud de onda.

En la actualidad la tecnología de transporte óptica (*Optical Transport Network* - OTN) utilizada en redes ópticas es la multiplexación por longitud de onda (WDM). Esta tecnología es capaz de transportar múltiples canales (entre 40-80 [7] en *Dense Wavelength Division Multiplexing* - DWDM) en una misma fibra basándose en portadoras de distintas longitudes de onda.

Esta tecnología también introduce una granularidad fija en el ancho de banda de los canales transportados a través de la fibra, limitada por la distancia entre las distintas portadoras a una longitud fija. La Recomendación ITU-T G.694.1, establece una serie de rejillas espectrales fijas, que dividen el espectro óptico relevante entre 1530–1565 nm (banda C), para el uso de DWDM, que van desde los 12.5 GHz hasta los 100 GHz, aunque las más utilizadas y extendidas son la de 50 GHz y 100 GHz.

Este hecho implica, por un lado que canales con una demanda más baja que la máxima soportada por la granularidad impuesta, infrautilicen recursos de la red. Y por otra parte, en la actualidad, ya se está investigando la transmisión de canales a 400 Gbps e incluso 1 Tbps. Velocidades o tasas de datos que no pueden ser transmitidas a largas distancias mediante una única portadora dentro de la rejilla de 50 GHz.

Estos dos factores, infrautilización de recursos en demandas pequeñas y limitación en la máxima velocidad impuesta por la rejilla fija, deben ser tomados en cuenta conjuntamente, ya que en la actualidad y en el futuro, el tráfico en la red es y será altamente heterogéneo por lo que la flexibilización en la disposición de los recursos de la red óptica es un reto ante el que la industria se enfrentará en los próximos años.

Recientemente formatos de modulación multiportadora como *Orthogonal Frequency Division Modulation* (OFDM), están atrayendo la atención de numerosos investigadores para abordar este problema [2][10][11]. Estas técnicas multiportadora permiten la transmisión de canales de gran capacidad mediante la división en subportadoras de menor velocidad multiplexadas conjuntamente a través de la red. OFDM permite ajustar la velocidad de transmisión, a las necesidades del cliente, mediante la elección del número de subportadoras a transmitir.

Por consiguiente, la solución a estos problemas consistirá en flexibilizar la rejilla espectral, permitiendo la transmisión de canales con anchos de banda variable que se ajusten a la demanda de dichos canales.

### 2.1.1 Concepto de Redes Ópticas Elásticas y Flexgrid

Podemos empezar definiendo las redes ópticas elásticas como una OTN donde todo el equipamiento y el plano de control puede manejar canales ópticos de ancho de banda variable, y cuyos elementos de conmutación (*Optical Cross Connects* - *OXC*s ó *ROADMs*) pueden soportar distintas granularidades en la anchura espectral de los canales que transportan la información.

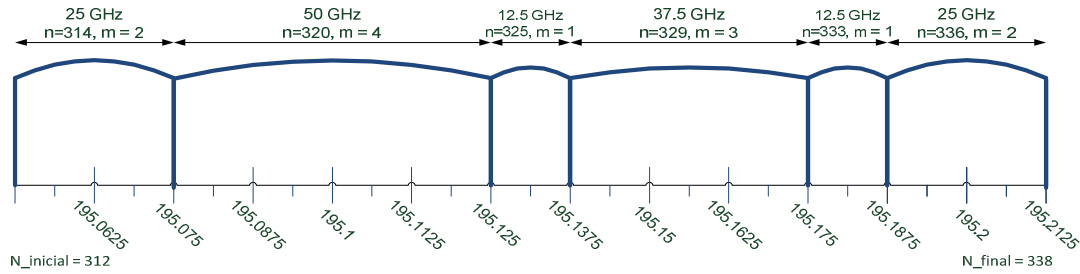
El primer cambio importante en la arquitectura de las redes ópticas elásticas es la sustitución de la rejilla fija por una nueva flexible (plano de control). La ITU-T está trabajando en una revisión del estándar G.694.1 [8], en una división del espectro óptico flexible llamada *Flexgrid*. El espectro óptico de la banda C (1530–1565 nm) es dividido en ranuras (*frequency slots*) de un tamaño fijo (6.25, 12.5, 25, 50 GHz) [9], y se asigna una frecuencia central (CF) a cada *Elastic Optical Path* (EOP) que debe coincidir con el principio o el final de estas ranuras.

$$\text{Central Frequency} = 193.1 \text{ THz} + n \cdot 0.00625 \text{ THz}.$$

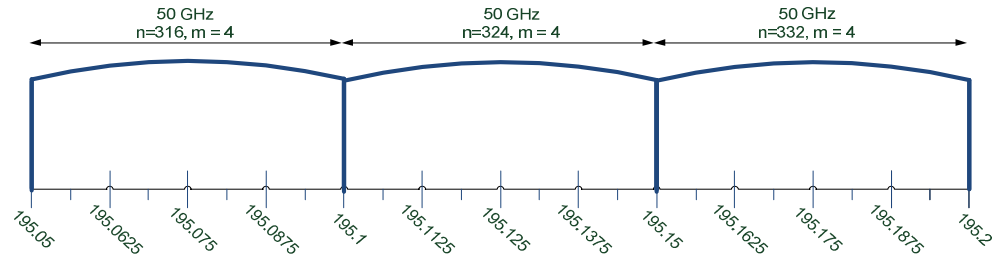
El segundo concepto es el ancho de ranura (*Slot width*) que se mide en múltiplos de 12.5 GHz [9].

- $Slot\ Width = 12.5\ GHz \cdot m$ , donde  $m$  es un entero positivo.

De esta manera podemos perfectamente definir un EOP mediante estos dos únicos valores  $n$  y  $m$ .



**Figura 2-1: Ejemplo de asignación de canales en Flexgrid.**



**Figura 2-2: Ejemplo de asignación de canales en rejilla fija de 50GHz.**

En segundo lugar hay que tener en cuenta los elementos de la red que pueden hacer posible el despliegue de este tipo de redes. Ya hemos hablado de la necesidad de que los transpondedores (transmisores ópticos) sean capaces de transmitir señales de diferente tasa de datos, y asimismo sean capaces de transmitir diferentes formatos de señal. Esta última característica ofrece a los diseñadores de estas nuevas redes, la capacidad de adaptar el formato de la señal transmitida en función de la relación señal ruido óptica (OSNR) requerida para la longitud del EOP que atravesará dicha señal.

Sin embargo queda por definir un modelo de nodo que integre por un lado los *Bandwidth Variable Transponders* (BV-T) y los *Bandwidth-Variable Wavelength Cross Connect* (BV-WXC), elementos de conmutación capaz de adaptar el ancho de banda de los filtros en función del ancho de banda del canal que los atraviese. En las siguientes secciones definiremos en profundidad estos componentes.

## 2.1.2 Sistemas de transmisión para redes ópticas elásticas

En primer lugar se van a presentar (y explicar en profundidad) distintas tecnologías de transmisión que permiten, por sus características, la implementación mediante ellas del concepto de red elástica.

Como se ha comentado anteriormente en el apartado 2.1.1, las redes ópticas elásticas tienen como motivación tanto la transmisión eficiente de canales de baja capacidad (10/40 Gbps), como la transmisión de señales de mayor capacidad en el futuro (100/400 Gbps y 1Tbps). Para conseguir la transmisión eficiente de canales de baja capacidad ya se ha hablado de la necesidad de sustituir la rejilla espectral actual por una nueva de granularidad más baja, que permita, que formatos de modulación con alta eficiencia espectral (EE), en bits por símbolo, sean explotados en su totalidad. En la Tabla 2-1, se recoge un resumen de distintos formatos de señal y la ganancia (en EE) que se podría obtener aplicando *Flexgrid* con respecto a los sistemas actuales basados en rejilla de 50GHz.

	EE (bits /símbolo)	Data Rate (Gbps)	Baud Rate (Gbaud)	Asignación en Flexgrid (granularidad 12.5 GHz)	Asignación en rejilla fija 50 GHz	Ganancia
<b>BPSK</b>	1	10	11.2	11.2+10 / 2 slots	1 canal	25 vs 50 GHz = 100%
<b>QPSK</b>	2	40	22.4	22.4+10 / 3 slots	1 canal	37.5 vs 50GHz = 33%
<b>16-QAM</b>	4	40	11.2	11.2+10 / 2 slot	1 canal	25 vs 50GHz = 100%
<b>64-QAM</b>	6	100	18.7	18.7+10 / 3 slots	1 canal	37.5 vs 50GHz = 33%
<b>DP-QPSK</b>	4	100	28	28+10 / 4 slots	1 canal	50 vs 50 GHz = 0%
<b>DP-16-QAM</b>	8	400	56	56+10 / 6 slots	4x100Gb/s en 4 canales de 50	75 vs 200GHz = 167%
<b>DP-64-QAM</b>	12	400	37.4	37.4+10 / 4 slots	4x100Gb/s en 4 canales de 50	50 vs 200GHz = 300%

**Tabla 2-1: Comparativa de formatos de señal, ganancia Flexgrid vs Rejilla fija 50GHz.**

Es un modelo muy simplificado en el que se estima una sobrecarga (*overhead*) del 12% en la carga útil debido a la asunción de la utilización de códigos correctores de errores (FEC) para aumentar el alcance de las señales, y una banda de guarda fija entre canales adyacentes de 10 GHz. Este dato ha sido estimado a partir de la degradación de la banda útil de la señal que se produce tras su paso a través de varios filtros en cascada. A atravesar varios filtros la atenuación que produce la imperfección de los filtros en los laterales de la banda degradan la señal reduciendo la banda útil del filtro.

En [20], para una señal de 112 Gb/s (100Gb/s + *overhead*) y los formatos de modulación *Dual Polarization –Quadrature Shift Keying* (DP-QPSK) y *Dual Polarization – 16 Quadrature Amplitude Modulation* (DP-16-QAM), se ha efectuado un estudio de esta degradación al atravesar 10 filtros. La reducción de la banda a 3dB por debajo del valor



máximo, paso de 33 GHz a 19.5 GHz, y de 45 GHz a 31.5 GHz en la respuesta equivalente del filtro que atraviesan ambas señales respectivamente. En este ejemplo se ha estimado una banda de guarda más pequeña debido a que el número de saltos medio en las redes estudiadas están en torno a 3 y 6 saltos.

Los datos recogidos muestran que la ganancia de la utilización de la rejilla flexible puede oscilar entre el 33% y el 300% en el caso *superchannels*. Llamamos *superchannels* o súper canales a un conjunto de canales ópticos muy poco espaciados espectralmente, que pueden ser enrutados conjuntamente formando un único canal lógico. Están formados por subcanales basados en formatos de modulación de una amplia eficiencia espectral gracias entre otras técnicas a la multiplexación en la polarización (*Polarization Multiplexing* - PM) de las señales [21] y a la detección coherente en recepción (*Coherent Detection* - CD) [22]. La generación de súper canales se realiza mediante técnicas de modulación multiportadora que van a ser explicadas en las siguientes secciones en profundidad, ya que sustentan la base teórica de la puesta en práctica de las redes elásticas.

#### **2.1.2.1 Optical-OFDM**

La multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) es una tecnología de modulación basada en la transmisión de señales de alta velocidad, mediante la división de la misma en un número grande de subportadoras de menor capacidad. Esta división permite ajustar el ancho de banda de la señal a transmitir, eligiendo únicamente el número de subportadoras que la generan. Esta arquitectura fue por primera vez propuesta en [10].

OFDM es una clase especial de modulación multi-portadora (*MultiCarrier Modulation* - MCM) basada en la propiedad de ortogonalidad de todas las señales que forman el canal a transmitir. Esta propiedad permite concentrar las señales subportadoras en mucho menor ancho espectral que en el caso de WDM, ya que, utilizando esta técnica de modulación, el espectro de las subportadoras puede solaparse con el resto permitiendo la eliminación de bandas de guarda entre las mismas.

En el dominio espectral, la propiedad de ortogonalidad se consigue estableciendo que las frecuencias centrales de cada subportadora estén separadas entre sí un múltiplo entero del inverso de la duración de símbolo. Es decir, si  $T_s$  es la duración de símbolo, la frecuencia central de cada subportadora deberá estar separado  $n/T_s$  donde  $n$  es un número entero.

En la Figura 2-3 se puede observar como el máximo valor en el espectro de la señal de cualquier subportadora, coincide con los “ceros” del resto. De esta manera al realizar el muestreo en esos puntos, conseguiremos que no haya solapamiento espectral, y por lo tanto, que la señal de información se pueda recuperar sin error.

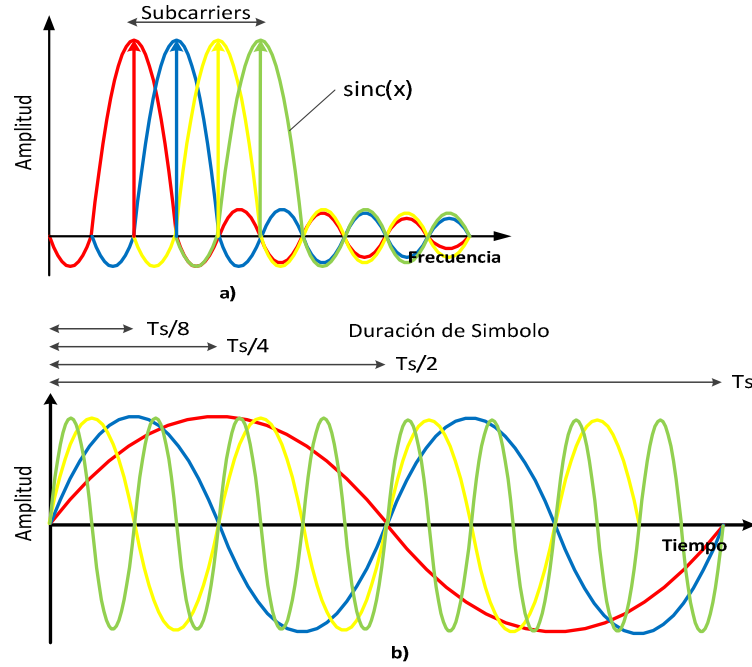


Figura 2-3: Señal OFDM en el dominio a) frecuencial b) temporal.

Una señal multiportadora  $s(t)$  se puede expresar como [2]:

$$(1) \quad s(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^{N_{sp}} c_{kj} S_k(t - jT_s)$$

$$(2) \quad S_k(t) = \Pi(t) e^{j2\pi f_k t}$$

$$(3) \quad \Pi(t) = \begin{cases} 1, & (0 \leq t \leq T_s) \\ 0, & (t < 0, t > T_s) \end{cases}$$

Donde  $C_{jk}$  es el  $j$ -ésimo símbolo de información correspondiente a la  $k$ -ésima subportadora,  $f_k$  es la frecuencia de cada subportadora,  $S_k$  es la forma de onda de la señal subportadora,  $N_{sp}$  es el número de subportadoras,  $T_s$  es el periodo de símbolo y  $\Pi(t)$  es una función escalón de duración  $T_s$ . El símbolo de información detectada en recepción será:

$$(4) \quad C'_{ik} = \int_0^{T_s} r(t - iT_s) s_k^* dt = \int_0^{T_s} r(t - iT_s) e^{-j2\pi f_k t} dt$$

Donde,  $r(t)$  es la señal recibida. La condición de ortogonalidad se produce si hay correlación entre cualesquiera dos subportadoras:

$$(5) \quad \delta_{ki} = \int_0^{T_s} s_k s_i^* dt = \int_0^{T_s} e^{j2\pi(f_k - f_i)t} dt = e^{j\pi(f_k - f_i)T_s} \frac{\sin(\pi((f_k - f_i)T_s))}{\pi((f_k - f_i)T_s)}$$

$$\delta_{kl} = \int_0^{T_s} s_k s_l^* dt = \int_0^{T_s} e^{j2\pi(f_k - f_l)t} dt = e^{j\pi(f_k - f_l)T_s} \frac{\sin(\pi(f_k - f_l)T_s)}{\pi(f_k - f_l)T_s}$$

es decir, si se cumple la condición:

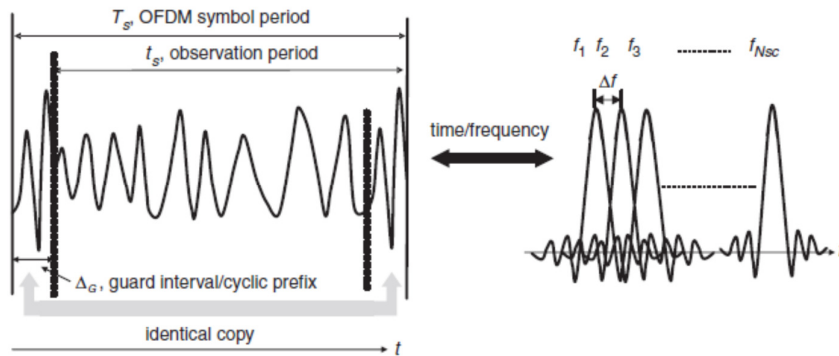
$$(6) \quad f_k - f_l = m \frac{1}{T_s} \text{ ó } f_k = \frac{k-1}{T_s}, \Delta f = \frac{1}{T_s}$$

Se puede observar que si las subportadoras están separadas entre sí un múltiplo entero del inverso de la duración de símbolo  $\Delta f$ , entonces se pueden recuperar sin solapamiento, ni interferencia entre símbolos (*Inter Symbol Interference* - ISI), con los filtros, representados mediante  $S_k^*$  en la eq. (4), centrados en la frecuencia de la subportadora  $k$  a recuperar.

Para reducir el impacto de esta distorsión se introduce un intervalo de guarda ( $\Delta_G$ ) y un prefijo fijo (*cyclic prefix*, Figura 2-4) entre los símbolos OFDM. La duración del intervalo de guarda está limitada por el máxima diferencia en el retardo (*delay spread*) introducido por el canal a las distintas subportadoras. La banda de guarda a introducir debe ser mayor que el máximo *delay spread* introducido por la dispersión cromática del medio óptico. Este valor se calcula a partir de la ecuación (7).

$$(7) \quad \frac{c}{f^2} |D_t| \cdot N_{sc} \cdot \Delta f \leq \Delta_G$$

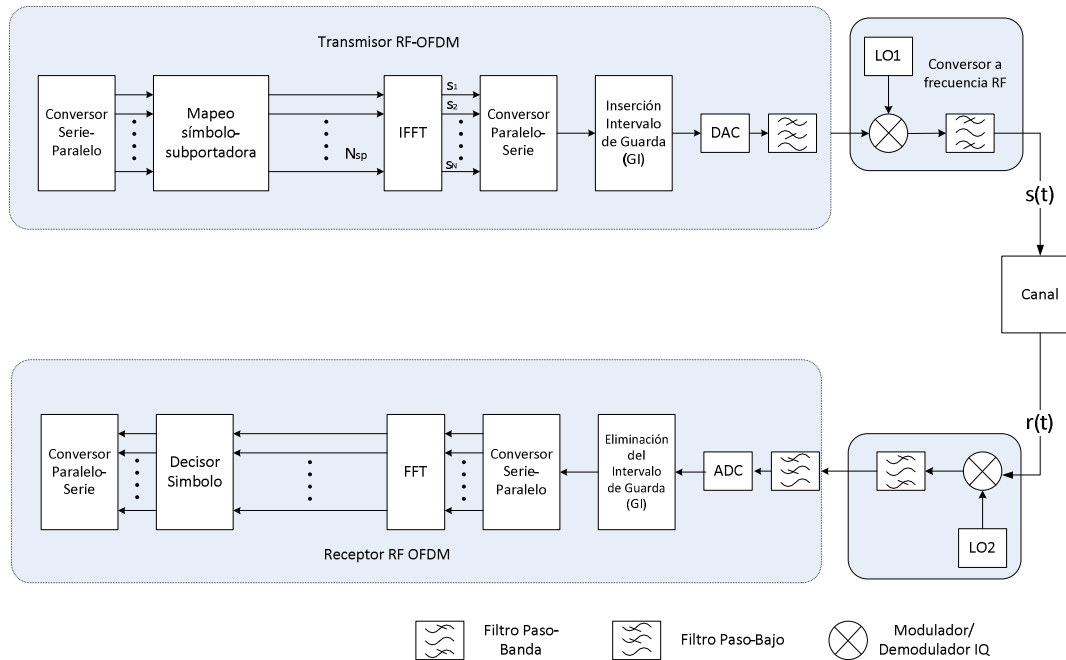
Donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $f$  es la frecuencia de la portadora óptica,  $D_t$  la dispersión cromática acumulada en unidades de ps/pm y  $N_{sc}$  el número de subportadoras. Para reducir la sobrecarga introducida por la  $\Delta_G$ , la duración del símbolo debe ser lo más largo posible, por lo que el flujo de datos inicial se divide en el mayor número de subportadoras posible.



**Figura 2-4: Símbolo OFDM en dominio temporal y frecuencial [57].**

La Figura 2-5 muestra un sistema OFDM completo. A la entrada recibe un flujo de datos (bits) en serie, que primero es convertida a múltiples series en paralelo reduciendo así la velocidad de símbolo de los flujos resultantes, que van a ser modulados por las subportadoras. En sistemas de transmisión ópticos los canales sufren retardo en función de

la frecuencia a la que viajan (*delay spread*). Esta distorsión implica que, al tener múltiples flujos de datos viajando en distintas subportadoras, y en cada uno de ellos viajen símbolos intercalados de un flujo de datos común, puede producirse interferencia entre símbolos (ISI) si un “sub-canal” sufre más retardo que el resto. Además, la condición de ortogonalidad entre subportadoras debe mantenerse en todo caso.



**Figura 2-5: Diagrama de bloques de un sistema OFDM, transmisor y receptor [12]; (IFFT: Inverse Fast Fourier Transform; FFT: Fast Fourier Transform; DAC: Conversor Digital-a-Analógico; ADC: Conversor Analógico-a-Digital; LO: Oscilador Local; IQ: In-phase/Quadrature phase).**

Estas cadenas de bits serán “mapeadas” en símbolos pertenecientes a una constelación de señales. Para el mapeo de una señal OFDM suelen utilizarse dos tipos de esquema de modulación: modulación por desplazamiento de fase de M símbolos (M-PSK) ó modulación de amplitud en cuadratura (M-QAM). La elección del tipo de modulación viene motivada por la distancia del canal que la señal debe recorrer, el número de filtros que atravesará la señal, y en general los parámetros físicos de los elementos pasivos de la red. El ajuste del tipo de modulación es otro de los aspectos que se puede variar en las redes elásticas para obtener un mayor aprovechamiento de los recursos de la red, es decir, es otro factor a incluir en los algoritmos de planificación RSA para redes elásticas

Las subportadoras se modulan mediante la transformada discreta inversa de Fourier (*Inverse Discrete Fourier Transform -IDFT*). Después se introduce el intervalo de guarda entre símbolos, se realiza la conversión de digital a analógico, y se filtra la señal paso bajo para eliminar las componentes fuera de la banda deseada. Por último, se realiza la

conversión a la frecuencia RF, y en el caso óptico, se realizaría una segunda conversión de la frecuencia RF a un canal óptico mediante un modulador Mach Zender (*Mach Zender Modulator*- MZM). Al lado de la banda deseada se genera una banda imagen, que deberá ser eliminada antes de la transmisión mediante un filtro paso banda (*Band Pass Filter*- BPF). El proceso en recepción es análogo usando la transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* - DFT) en este caso, para la demodulación. Para reducir la complejidad de cómputo que introducen las transformadas se hace uso de los algoritmos “rápidos” para la transformada de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT, *Inverse Fast Fourier Transform*- IFFT).

OFDM es una tecnología muy eficiente en la asignación de recursos de red gracias a la superposición de subportadoras en el espectro. También ofrece una gran escalabilidad en la generación de canales de datos, ya que se puede ajustar fácilmente la velocidad de transmisión mediante la elección del número de subportadoras que forman la señal. Gracias a la división en subportadoras ofrece gran resistencia a los efectos de distorsión en largas distancias. Y por último, se puede variar el formato de modulación con que se mapean los símbolos de las subportadoras, lo que permite adaptar la señal al canal por el que va a ser transmitida. Todas estas características encajan con la definición de redes elásticas expuesta en la sección 2.1.1.

#### 2.1.2.2 Nyquist WDM

Otra técnica recientemente investigada [16] para la transmisión de múltiples canales consiguiendo una alta eficiencia espectral es la llamada Nyquist WDM. Consiste en la concatenación de varios canales WDM con una respuesta en frecuencia rectangular y ancho de banda igual la frecuencia de símbolo  $R_s$  (*baudrate*). Idealmente este sistema podría alcanzar la máxima eficiencia espectral (1 símbolo/Hz).

Mediante la generación de pulsos con forma de *sinc* en el tiempo, se consigue una respuesta en frecuencia (en caso de que la función *sinc* se extendiese infinitamente) ideal con forma de pulso rectangular. Como se puede observar en la Figura 2-6 (figura de la derecha), en el caso ideal, no se produce *crosstalk* entre bandas adyacentes, además si la

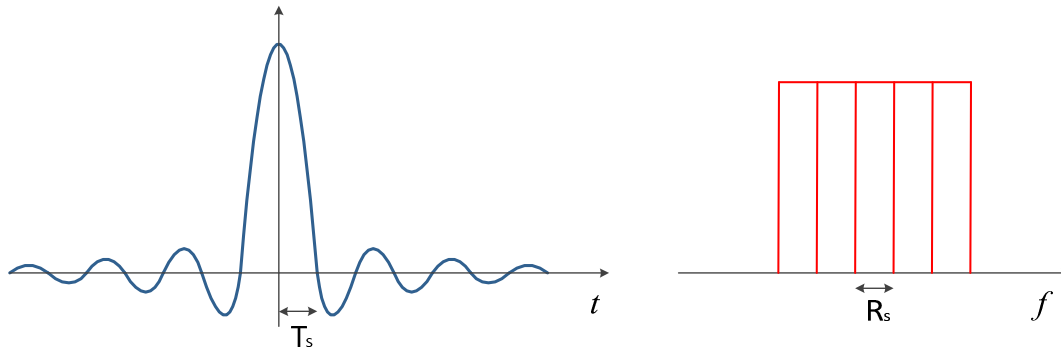


Figura 2-6: Respuesta en frecuencia (drc.) y en el tiempo (izq.) de una señal N-WDM.

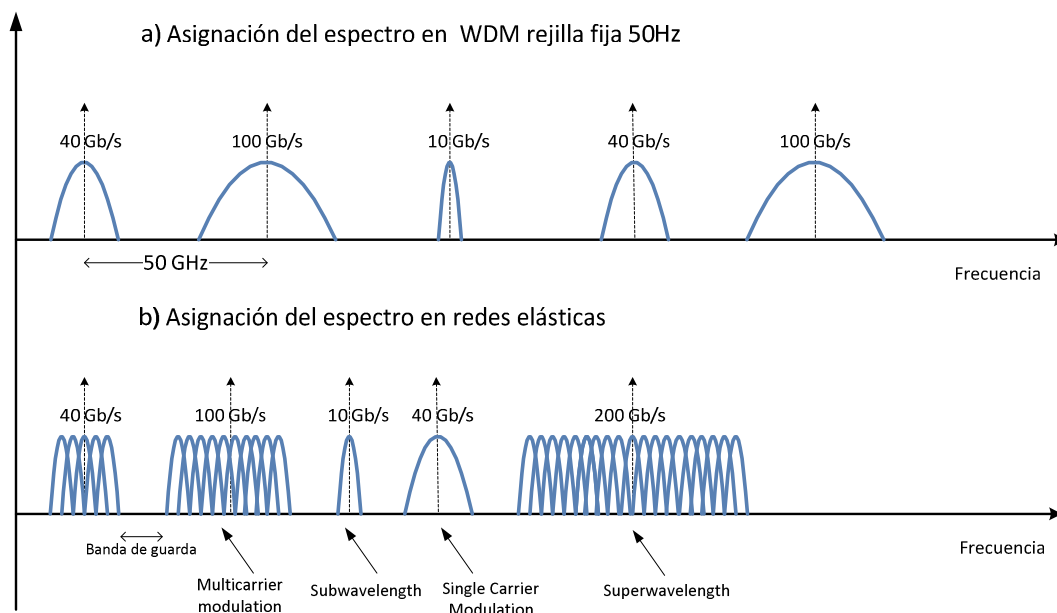
recepción está perfectamente sincronizada y el muestreo se realiza en el instante óptimo, no se produce ISI [17].

Mediante esta técnica, se ha comprobado experimentalmente, [18][19] la transmisión de *superchannels* a 1Tbpsa través la multiplexación de nueve canales NRZ-PM-QPSK a 111Gb/s, con un espaciado entre canales de 27.75 GHz (correspondiente al *baudrate* de la señal). Los resultados muestran que la transmisión de esta señal es posible en la práctica, a una distancia máxima de 2300 Km.

## 2.1.3 Arquitectura y tecnologías de transmisión para las redes elásticas.

### 2.1.3.1 Arquitectura de las redes elásticas.

El concepto central de las redes elásticas consiste en la flexibilidad a la hora de generar canales, tanto en la velocidad de transmisión como en el formato de señal elegido para transmitir.



**Figura 2-7: a) Canales convencionales en redes WDM basadas en rejilla fija de 50 GHz; b) Canales posibles en redes elásticas con ancho de banda variable y distintos formatos de señal.**

Como se puede observar en la Figura 2-7, esta flexibilidad permite no solo un ahorro en el espectro consumido en la transmisión de ciertos canales, debido principalmente a la desaparición de la rejilla fija, sino también permite la generación de “*súper-canales*”, con

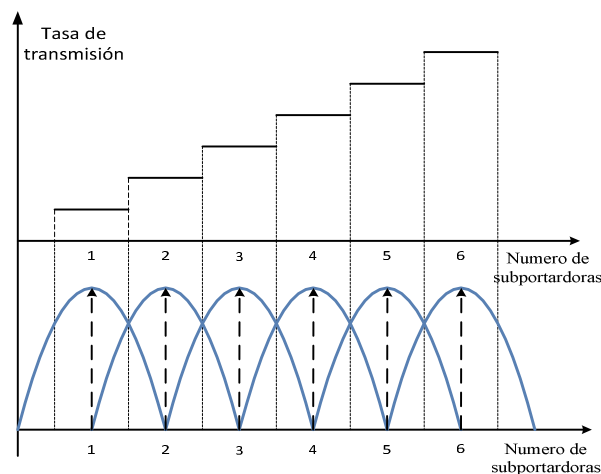
un ancho de banda mayor de 50GHz o de 100GHz. Para poder realizar todas las operaciones de transmisión y conmutación en las redes elásticas son necesarios dos elementos fundamentales: ROADMs encargados del filtrado y la conmutación de los canales; y los BV-T transpondedores variables para la generación de las señales.

### 2.1.3.2 Transpondedor Variable: Tasa de datos/Ancho de Banda

Para explotar completamente la red, aparte de flexibilizar el ancho de banda de los canales enviados, es necesario contar con una arquitectura de red que permita la transmisión de diferentes formatos de señal para el transporte de dichos canales.

Este concepto se sustenta en que, en función de la distancia, número de ROADMs atravesados y a los parámetros físicos de la fibra atravesada, la sensibilidad requerida en la recepción, para distintos formatos de modulación y una tasa de error fija (*Bit Error Ratio – BER*) varía, con lo que en algunos casos, canales que atraviesen pocos nodos, o que su recorrido sea “corto”, podrán admitir formatos de señal menos robustos que proporcionen una mayor eficiencia espectral.

Mediante las técnicas de transmisión multiportadora comentadas en previas secciones, ajustando el número de subportadoras que conforman la señal a transmitir, se puede ajustar la velocidad de transmisión. En [23] se demuestra experimentalmente un transpondedor variable con tasas de datos entre 40Gbps y 400Gbps con una granularidad de 10Gbps por subportadora separadas 10GHz entre sí. Y en [24], se demuestra experimentalmente un



**Figura 2-8: Variación del ancho de banda o tasa de datos, en función del número de subportadoras compendedoras de la señal OFDM [11].**

transpondedor variable basado en OFDM, que a la vez incorpora dos formatos distintos de señal: DQPSK y DPSK. Señales a 107 Gbit/s (5 x 21.4-Gbit/s DQPSK), 42.8 Gbit/s (2 x

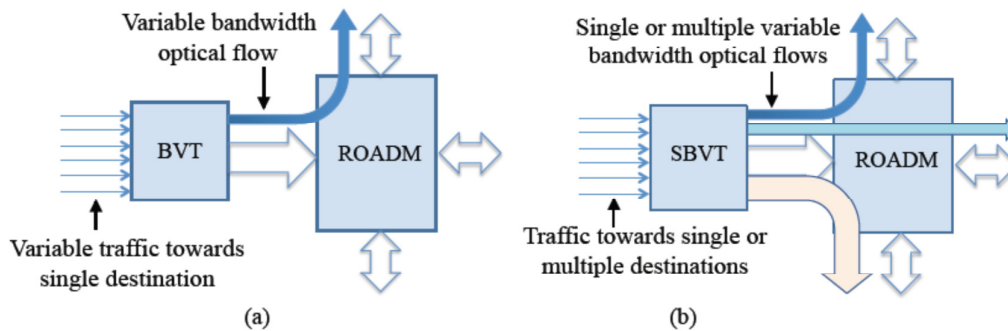
21.4-Gbit/s DQPSK), 32.1 Gbit/s (21.4-Gbit/s DQPSK y 10.7-Gbit/s DPSK), 10.7 Gbit/s (1 x 10.7-Gbit/s DPSK) son experimentalmente generadas por una fuente multiportadora basada en la elección del número de subportadoras cambiando la amplitud de dos osciladores (de 5 y 10GHz respectivamente) y mediante el ajuste del voltaje de BIAS aplicado al modulador *zero-chirp Mach Zender* (MZM).

### 2.1.3.3 Sliceable Transponder

Arquitecturalmente las redes elásticas ofrecen una contrapartida a la hora de ser llevadas a la práctica. Ya hemos visto que la transmisión de múltiples *datarates* es posible mediante el ajuste elástico del ancho de banda que se asigna a cada canal mediante la elección del número de subportadoras o de diferentes formatos de modulación. Dicha flexibilidad se consigue mediante la capacidad de los BVTs de transmitir a diferentes capacidades y/o formatos de modulación.

Sin embargo, la capacidad máxima de dichos transpondedores es fija, es decir, está limitada por el número de subportadoras a generar, por la velocidad de los osciladores que lo implementan, o por los formatos de modulación disponibles dentro de la arquitectura del BVT. Por tanto, si se transmiten canales de capacidad inferior a la máxima permitida, se está desperdiciando parte de la capacidad del transpondedor. Este hecho dificulta la justificación económica de la inversión en este tipo de transpondedores.

Para abordar esta limitación, una solución propuesta por primera vez en [56], consiste en que el transpondedor sea capaz de asignar su capacidad en uno o varios flujos ópticos que luego puedan ser transmitidos hacia destinos diferentes. De esta manera, cuando se genera un canal óptico de baja capacidad, la capacidad restante pueda ser aprovechada para transmitir otros flujos de datos independientes. Esta arquitectura ha sido denominada como *Sliceable Bandwidth Variable Transponder* (SBVT).



**Figura 2-9: Funcionalidades del: a) *bandwidth variable transponder* (BVT); b) *Sliceable bandwidth variable transponder* (SBVT)[58].**

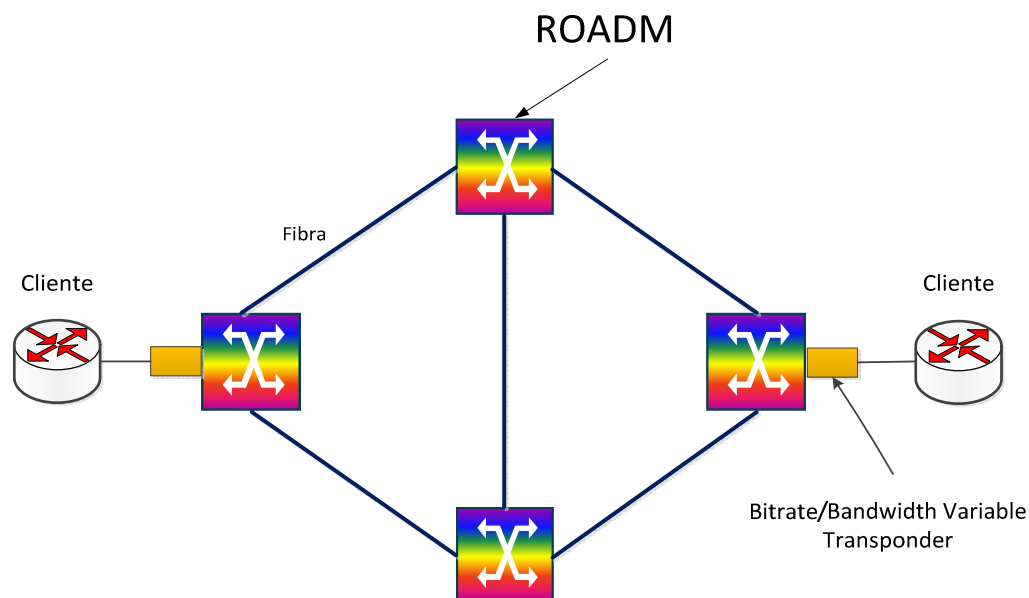


Esta Figura 2-9 muestra las diferentes arquitecturas internas de la transmisión óptica utilizando un BVT o un SBVT. La elección de la arquitectura SBVT permite un aumento en el rendimiento del equipamiento óptico desplegado, una reducción en el volumen global del mismo y una reducción también del equipamiento de la capa IP [58].

## 2.1.4 Conmutación óptica flexible

### 2.1.4.1 Tecnologías de conmutación

Los nodos intermedios en una red óptica o malla fotónica, deben cumplir con dos funcionalidades básicas: enrutar el tráfico itinerante que atraviesa el nodo, a esto le llamaremos *Express Path Switching*; y añadir o extraer las longitudes de onda portadoras, o canales, que tienen como origen o destino el propio nodo (funcionalidad *Add/Drop*).

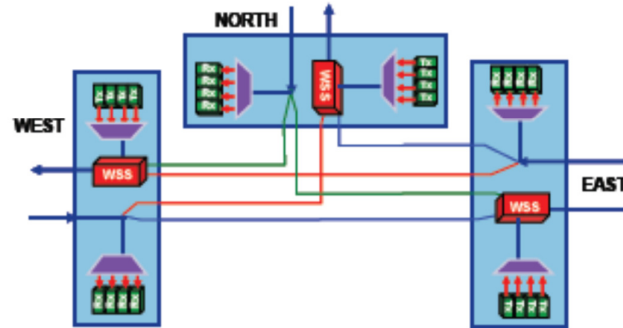


**Figura 2-10: Arquitectura de red elástica.**

Un ROADM es una arquitectura de nodo que combina estas dos funcionalidades mediante el uso de la tecnología *Wavelength Selective Switch*(WSS), que permite filtrar las longitudes de onda deseadas hacia cada fibra destino. Además los ROADM incluyen una funcionalidad muy importante, y es la capacidad de ser reconfigurados remotamente. Esta característica es clave para la nueva generación de redes elásticas que se está proponiendo.

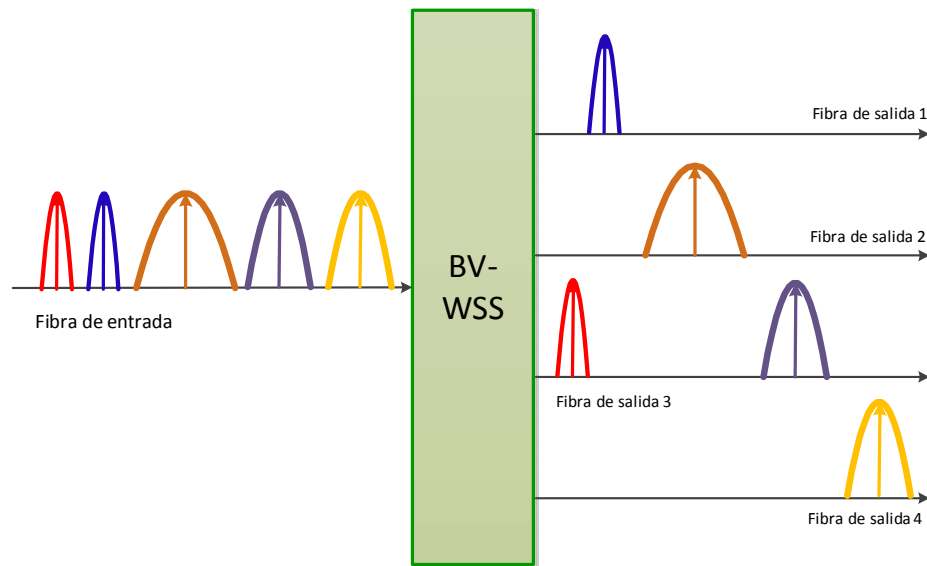
La arquitectura básica (Figura 2-11) de un ROADM basada en WSSs permite la conmutación transparente, reconfigurable y escalable de canales ópticos hacia un numero de fibras de salida igual al grado “nD” del nodo ROADM. Dado que los WSS pueden ser

reconfigurados remotamente, esto permite que la conmutación de canales ópticos en los nodos intermedios sea transparente para el planificador de la red.



**Figura 2-11: Arquitectura ROADM simple [27].**

Los WSS tradicionales están diseñados para la conmutación de canales con un espaciado fijo (ITU-T rejilla fija 50 o 100 GHz), sin embargo en las redes elásticas se ha de permitir el paso de canales de distinta granularidad. La Figura 2-12 muestra el funcionamiento de esta nueva generación de *bandwidth-variable* WSSs. Para su implementación, hay dos

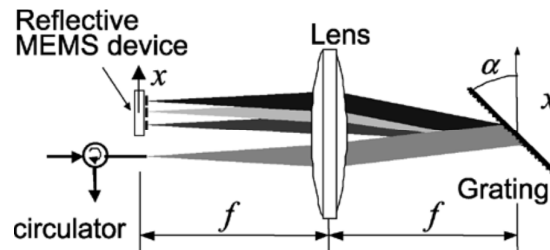


**Figura 2-12: Esquema funcionamiento de un bandwidth-variable WSS.**

tecnologías que pueden conseguir granularidades más “finas” de filtrado que las que se emplean actualmente.

En primer lugar la tecnología *Liquid Crystalon Silicon* (LCoS), basada en una pantalla de alta resolución formada por píxeles de cristal líquido y componentes semiconductores. Cada pixel está programado para producir una cierta desviación en el haz de luz que recibe, y mediante la elección del número de píxeles configurados de la misma manera se puede ajustar el “ancho” en la longitud de onda seleccionada. En [25], un WSS flexible basado en la tecnología LCoS que soporta una granularidad de 12.5 GHz en el ajuste del ancho de banda del canal seleccionado.

Y en segundo lugar la tecnología *Micro-Electro Mechanical System* (MEMS), basada en la difracción selectiva de las longitudes de onda incidentes en el filtro. Su funcionamiento es el siguiente: la señal luminosa compuesto por diferentes canales posicionados en diferentes longitudes de onda es descompuesto mediante una lente en un numero de haces paralelo (proceso llamado colimado), y mediante una rejilla de difracción (*Grating*) son reflejados de vuelta a la lente en función de su longitud de onda. Las longitudes de onda incidentes perpendicularmente (longitudes deseadas) en los micro espejos MEMS del dispositivo vuelven a ser dirigidas a la fibra mientras que las demás son filtradas. En [26], se explica detalladamente un modelo de este dispositivo con una granularidad de 13.2 GHz.



**Figura 2-13: Esquema de funcionamiento del filtro óptico basado en la tecnología MEMS [26].**

#### **2.1.4.2 Arquitecturas de ROADM**

Un factor importante en la arquitectura de los ROADMs es la elección de la configuración de los mismos en la funcionalidad *add/drop*. En la figura 2-11 se mostraba la arquitectura de un ROADM simple. En esta arquitectura, los transmisores y receptores del nodo están estáticamente asignados a una fibra en concreto mediante un multiplexor, es decir que la dirección hacia donde se dirigen las señales de los distintos transmisores están estáticamente predefinidas. En esta configuración tampoco existe la posibilidad de reconfigurar la longitud de onda de las conexiones entrantes o salientes automáticamente, sino que requiere de la intervención manual para dicha configuración.

Estas características limitan la flexibilidad en la planificación de la distribución de recursos espectrales en la red, y elimina la posibilidad de introducir dinamicidad a la hora de rediseñar los caminos que atraviesan los distintos canales de datos. Sin embargo, mediante

la adición de nuevos WSS y la introducción de cambios en la arquitectura del ROADM estas restricciones se pueden ir eliminando.

- **Arquitectura *Colorless* ROADM:** Si se introduce un nuevo WSS en cada módulo de recepción, y se sustituyen los multiplexores de salida de cada módulo transmisor por combinadores ópticos, se consigue que la elección de la longitud de onda para cada canal sea completamente automática y reconfigurable remotamente. Esta arquitectura, no obstante, mantiene fija la dirección de salida de los transmisores.
- **Arquitectura *Directionless* ROADM:** Para introducir flexibilidad a la hora de la elección de la dirección de transmisión hacia cualquier dirección, las funcionalidades *Add/Drop* y *Express Path Switching* se dividen en módulos separados. Ahora cada puerto de salida sólo se encargará de filtrar aquellas longitudes de onda que hayan sido configuradas en el WSS y, a la entrada del nodo por cada fibra, la señal entrante será dividida en tantos tramos como grados tenga el ROADM más hacia el módulo de Add/Drop, mediante un *splitter*. En el caso de la transmisión, mediante un acoplador los distintos canales son combinados en una sola fibra que será a su vez dividida hacia cada dirección de salida donde posteriormente serán filtradas aquellas longitudes de onda que deban ser transmitidas por dicha fibra. El módulo receptor, asimismo, cuenta con una pareja de WSS que, en primer término se encargará de filtrar las longitudes de onda no dirigidas a ser recibidas por el propio nodo, y en segundo lugar encaminará cada longitud de onda al puerto receptor correspondiente.

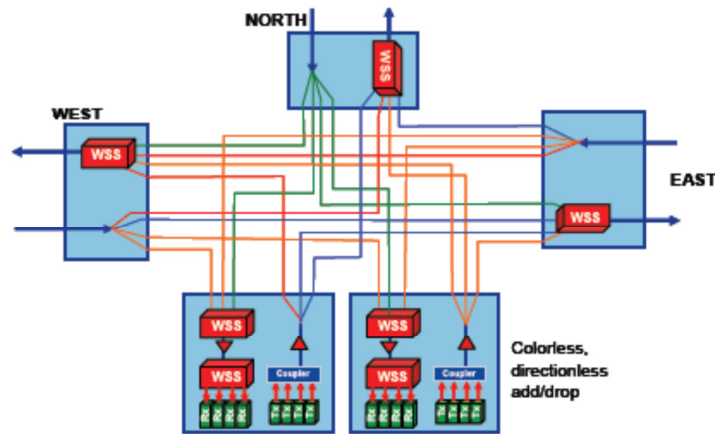


Figura 2-14: Arquitectura ROADM colorless, directionless [27].

- **Arquitectura *Contentionless*:** Por último, recientemente se ha discutido la necesidad de que varias longitudes de onda iguales puedan ser recibidas en un mismo nodo desde distintas fibras. El problema reside en que en las arquitecturas anteriores cuando dos longitudes de onda iguales confluyen en el mismo dispositivo WSS se produce un bloqueo. Para eliminar esta restricción en [51] se propone una arquitectura que combina la anterior estructura C&D basada en WSSs

y la introducción de un *Photonic Cross Connect (PXC)* en el módulo *Add/Drop*. Un PXC es un elemento de conmutación óptica similar al OXC, que está compuesto por una serie de N puertos de entrada y N puertos de salida, donde se conectan cada uno de los puertos entrada/salida del ROADM. En cada uno de los puertos de entrada, la señal es demultiplexada en un número máximo de canales (40 canales por puerto en [51]) mediante un *Array-Waveguide Grating (AWG)*. Los canales, una vez demultiplexados, son dirigidos hacia los receptores correspondientes, o hacia los puertos de salida, donde son multiplexados de nuevo un máximo de 40 canales por fibra.

Debido a que los WSS son reconfigurables mediante software, la configuración de los ROADMs es completamente automática. Desde el punto de vista del operador esto implica un alto ahorro en personal humano encargado de la reconfiguración de los equipos y permite (aunque no sea en la actualidad una preocupación de los operadores), reconfigurar dinámicamente las rutas de datos sin coste alguno y de forma completamente automática.

En el contexto de las redes elásticas, la configuración de los ROADM no varía. Únicamente es necesario que los WSS tengan la capacidad de filtrar señales de ancho de banda variable, y que los receptores sean flexibles a la hora de configurar el número de subportadoras que deben demultiplexar en función de la señal que reciban.

## **2.1.5 Recepción óptica**

### ***2.1.5.1 Detección directa***

En este tipo de recepción, la detección se basa en la conversión de la potencia de la señal de entrada al fotodetector en una corriente eléctrica proporcional a ella. La detección directa basada en la medida de la energía de la señal solo permite codificar un grado de libertad (*degree of freedom – DOF*) por polarización y portadora.

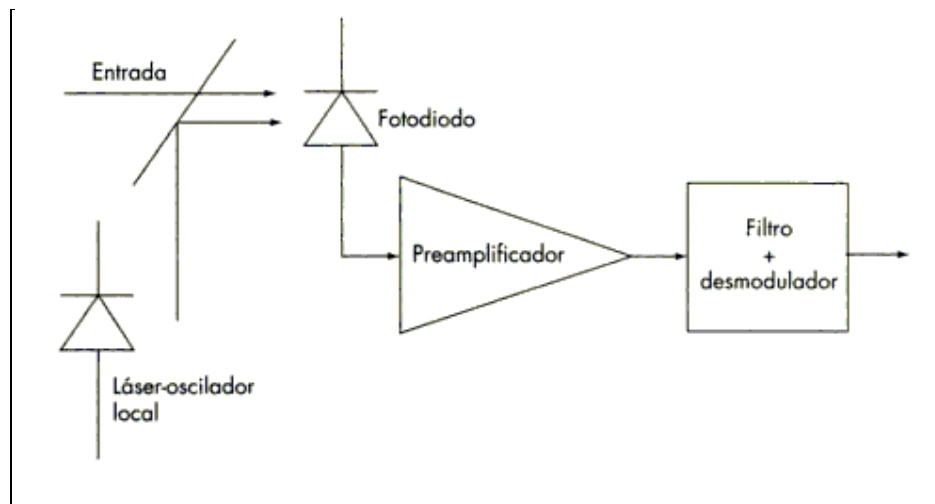
Además, con la detección directa se pierde la información de la fase de la señal durante la etapa de recepción, imposibilitando la transmisión de señales moduladas en formatos que utilizan la fase para portar la información. La pérdida de información de la fase también provoca que no sea posible ecualizar la señal en el receptor para relajar los efectos de las distorsiones del canal como la dispersión cromática (CD) o la dispersión por polarización modal producida en las fibras monomodo.

Los receptores basados en detección directa son significativamente más simples que los basados en detección coherente. Este hecho impacta seriamente en el coste de despliegue de la red, por lo que la detección directa ha sido ampliamente utilizada en sistemas con tasas de datos hasta 10Gbps. Sin embargo, el aumento de la demanda, y la introducción de canales con tasas de datos más altas, implica el uso de formatos con mayor eficiencia espectral para poder mantener el espaciado entre canales fijo (50GHz típicamente en sistemas WDM).

Por todo esto, en la actualidad, la detección coherente se postula como la solución más conveniente en el problema de la recepción de la señal.

### 2.1.5.2 Detección coherente

Un sistema de recepción coherente se basa en la combinación no lineal de la señal de entrada a detectar, con una portadora generada por un oscilador local. El esquema de un receptor coherente viene reflejado en la Figura 2-15.



**Figura 2-15: Esquema de detección coherente[59].**

Las señales de entrada y local se superponen en la superficie de un fotodetector, consiguiéndose una mezcla no lineal, gracias a la propiedad cuadrática de la amplitud de campo y la corriente eléctrica de este dispositivo[59].

La ventaja de un detector coherente subyace en que es sensible tanto a la amplitud de la señal recibida, como a la fase. Este hecho conlleva que las señales recibidas puedan estar moduladas en fase (BPSK, QPSK), lo que implica la posibilidad de aumentar la eficiencia espectral de los sistemas de comunicaciones ópticas e incluso alargar las distancias de transmisión, sin regeneración, de los mismos. Esta última propiedad, se basa en que los receptores coherentes pueden medir las distorsiones en la fase de la señal provocadas por las distorsiones introducidas en el canal, tales como CD o PMD, y posteriormente ser compensados mediante un módulo digital de procesado (DSP).

Sin entrar en el desarrollo matemático de la combinación no lineal entre la señal de entrada y el oscilador local que podemos encontrar en diversas fuentes de la literatura [59][60], el resultado de dicha combinación es la señal recibida modulada a una frecuencia igual a la diferencia entre la frecuencia de la señal  $f_s$ , y la frecuencia del oscilador  $f_{LO}$ , mas la diferencia de fase entre ambas ( $\varphi_s - \varphi_{LO}$ ) mas una componente en banda base de la amplitud de la señal del oscilador local. La ecuación de la señal recibida es:

$$P_s \propto e^{j\{2\pi(f_s - f_{LO})t + \varphi_s - \varphi_{LO}\}} \cdot E_s E_{LO} \cdot e^{j\Phi_D(k)}$$

Donde  $E_s$ ,  $E_{LO}$ ,  $f_s - f_{LO}$ ,  $\varphi_s$  y  $\varphi_{LO}$ , son las amplitudes del campo eléctrico, las frecuencias centrales y las fases, de la señal recibida y de la señal del oscilador, respectivamente.  $\Phi_D(k)$  es la distorsión de fase introducida por el canal.

Conociendo la frecuencia y la fase del oscilador local, es fácil medir la distorsión de fase introducida por el canal, debido a que es un valor constante que se agrega linealmente a la fase de la señal. Esta constante es incluida directamente en el DSP para la decisión del símbolo recibido, aumentando notablemente la tolerancia a la dispersión de las transmisiones con receptor coherente.

### **2.1.5.3 Procesador digital de señal (DSP)**

El post-procesado digital de la señal es una técnica ampliamente utilizada tanto en la recepción coherente como en recepción directa. Un DSP es un bloque lógico que recibe una señal de entrada, realiza la conversión analógica-digital a la tasa de símbolo de la señal y posteriormente es enviada a un circuito integrado encargado de realizar el procesamiento de la señal propiamente dicho. Un DSP puede realizar varios procesos distintos para implementar diferentes funcionalidades:

- El uso más común y para el que ha sido utilizado tanto en detección coherente, como para detección directa es el de compensar las distorsiones introducidas por el canal, tales como CD o PMD. Este proceso de ecualización es necesario para evitar el solapamiento entre señales o la interferencia entre símbolos (ISI).
- Otro uso es la introducción de códigos de corrección de errores (FEC). En este caso, el DSP en recepción sería el encargado de decodificar estos códigos.
- Para la demodulación de señales que incluyan multiplexación por polarización (PolMux), es necesario mantener un control continuo de la polarización de la señal para posibles fallos ocasionales que puedan ocurrir debido a una mala manipulación de la fibra sobre el terreno, o a un fallo de operación en las centrales.

Para terminar en la Figura 2-16 se muestra un diagrama de bloques con las principales funcionalidades de un DSP, tanto en la transmisión como en la recepción.

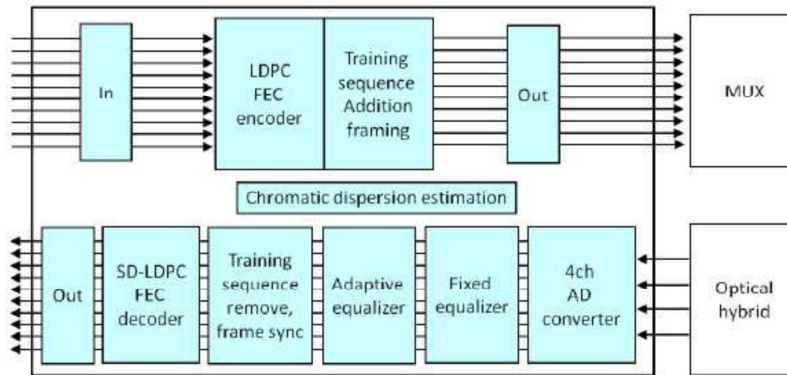


Figura 2-16: Esquema de un DSP[62].

## 2.2 Plano de Control para redes Ópticas Elásticas.

*Automatically Switch Optical Networks* (ASON)[50], es el modelo o arquitectura de red que permite que los procesos de señalización y enrutado, en las redes ópticas sean automáticas desde el lado del cliente. En los inicios de las redes ópticas, el proceso de configuración de los equipos de conmutación ópticos era manual, por lo que los canales ópticos eran fijos y los cambios en la planificación de las redes eran lentos y costosos. En la actualidad se utilizan sistemas de control automáticos para la generación de canales ópticos de datos, y el cliente puede definir un nuevo canal de información, únicamente definiendo el origen, el destino, el ancho de banda y los parámetros de calidad de servicio (QoS) de la demanda en cuestión.

Esta arquitectura de red, junto con el conjunto de protocolos *Generalized Multiprotocol Label System* o GMPLS [33] conforma el plano de control.

En la sección 2.1 hemos explicado en profundidad el concepto de las redes ópticas elásticas y hemos abordado lo que, según la clasificación anterior, sería el plano de datos. En esta sección nos enfocaremos en el plano de control basado en GMPLS y en el PCE.

### 2.2.1 GMPLS

#### 2.2.1.1 Introducción: Evolución de MPLS a GMPLS

GMPLS es un conjunto de protocolos, no un protocolo en sí mismo, y es la evolución del sistema MPLS utilizada en las redes de paquetes IP.

MPLS es un sistema de transmisión de datos basado en la conmutación de etiquetas (*labels*) o paquetes. Este sistema fue desarrollado por el IETF y fue construido sobre diferentes tecnologías de diversos fabricantes. Su funcionamiento consiste en asignar a cada paquete una etiqueta identificativa de manera que al paso por un router, este sea capaz



de identificar el paquete y reenviarlo, por otro puerto, hacia otra dirección con una nueva etiqueta. En una red MPLS cada router, denominado LSR (*Label Switch Router*), contiene una tabla de encaminamiento llamada LFIB (*Label Forwarding Information Base*) en la que se guarda la correspondencia entre la etiqueta de entrada, el puerto de salida para dicha etiqueta, y el nuevo valor de la etiqueta que debe ser intercambiado. Este sistema, por su sencillez, acelera mucho el proceso de conmutación de paquetes y permite que el formato de los datos que son encapsulados bajo dicha etiqueta, pueda ser de distintos tipos, bien se trafico IP, ATM, FrameRelay, etc.

Además, de esta manera es posible crear circuitos virtuales, para que determinados flujos de tráfico, sigan un camino determinado a través de la red y sea posible planificar el tráfico en la red para que no se produzca saturación de los recursos de la misma.

La introducción de MPLS en la redes de paquetes IP supuso un salto tecnológico importante, ya que los operadores a partir de entonces, fueron capaces de gestionar mucho más eficientemente los recursos de sus redes y comenzar a introducir técnicas de ingeniería de tráfico (*Traffic Engineering-TE*). De igual modo MPLS reduce el tamaño de las tablas de enrutamiento y también su coste.

Con la introducción de nuevas tecnologías de transporte como la multiplexación por división de tiempo (*Time Division Multiplexing - TDM*) o WDM para redes ópticas, se propuso crear nuevos protocolos propios que realizaran las tareas que realiza MPLS. Sin embargo, se descubrió que todas estas tecnologías compartían principios comunes y que, además, se podían aplicar las mismas técnicas de conmutación de etiquetas para gestionar otro tipo de recursos, ranuras temporales en TDM, longitudes de onda portadoras en WDM o incluso fibras enteras (*Fiber Switching*). Por tanto, se llegó a la conclusión de que quizás era mejor aunar esfuerzos en crear un sistema común para todos estos sistemas de transporte y así nació GMPLS.

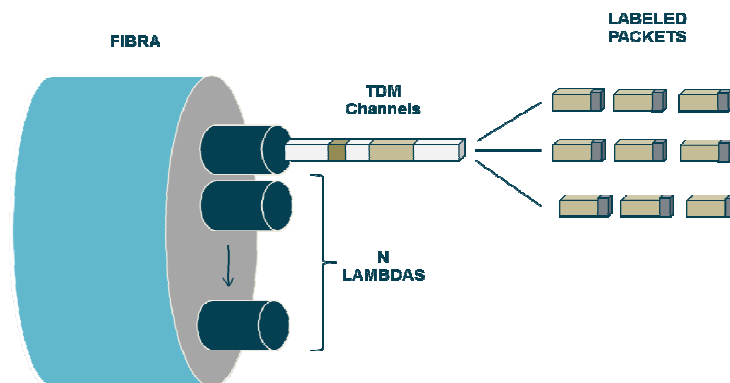
#### ***2.2.1.2 Extensiones y funcionalidades de GMPLS.***

GMPLS [33] extiende las funcionalidades de MPLS para conmutar distintos tipos de recursos. Estos son los siguientes tipos de tecnologías de transporte que pueden ser conmutadas mediante GMPLS:

- Packet Switch Capable (PSC).
- Layer-2 Switch Capable (L2SC).
- Lambda Switch Capable (LSC).
- Time Division Multiplex Capable (TDM).
- Fiber-Switch Capable (FSC).

Las redes actuales están formadas por subredes de distintas clases. El tipo de conmutación de una red define la unidad de datos que los dispositivos de esa red pueden conmutar.

Existe una jerarquía en la que las unidades de tráfico que comparten tramos comunes de la red se van agregando en unidades de tráfico mayores (mayor velocidad) que a su vez utilizan tecnologías de transporte distintas. Conceptualmente la jerarquía GMPLS nos define el nivel de conmutación al que se puede demultiplexar las señales de datos entrantes a la interfaz de un nodo, conmutarlas y reenviarlas por otra interfaz. La Figura 2-17 representa las jerarquías o niveles de conmutación en GMPLS. Como se puede observar los paquetes IP/MPLS pueden ir dentro de celdas temporales TDM que a su vez forman una cadena de celdas dentro de una longitud de onda o “*lambda*” de tecnología WDM.



**Figura 2-17: Jerarquía de conmutación GMPLS.**

En las redes ópticas la unidad de conmutación es la longitud de onda. Como ya hemos descrito en la introducción, este tipo de transmisión tiene asociada una rejilla espectral que subdivide el espectro de la banda de frecuencias, en huecos o *slots* de tamaño fijo (50-100 GHz para DWDM). Los canales ópticos en DWDM se pueden definir por tanto, únicamente con el valor de la frecuencia central del respectivo *slot* que tenga asignado.

En las redes elásticas ya hemos visto que el ancho de banda asignado a cada canal es flexible por lo tanto, para que GMPLS pueda conmutar este tipo de canales deberá incluir información acerca del número de *slots* que estén asignados a dicho canal, las extensiones necesarias para el conjunto de protocolos GMPLS serán descritas en el punto 4 de esta memoria.

Una vez definido cuales son los recursos que se conmutan en una red GMPLS, la jerarquía de tecnologías de transporte que soporta, y el principio de funcionamiento básico de este sistema, debemos definir que es un canal o LSP (*Label Switch Path*) en la terminología GMPLS.

Un LSP es el conjunto de recursos que atraviesan las señales desde un punto origen a un destino. Estos recursos son, tanto las fibras o enlaces de cualquier clase que conforman el camino físico, como las conexiones que se producen en los nodos intermedios que son atravesados. En el caso del transporte óptico, estos nodos ópticos son ROADM o OXC, y la configuración interna necesaria para dicha conexión óptica será la de los filtros WSS

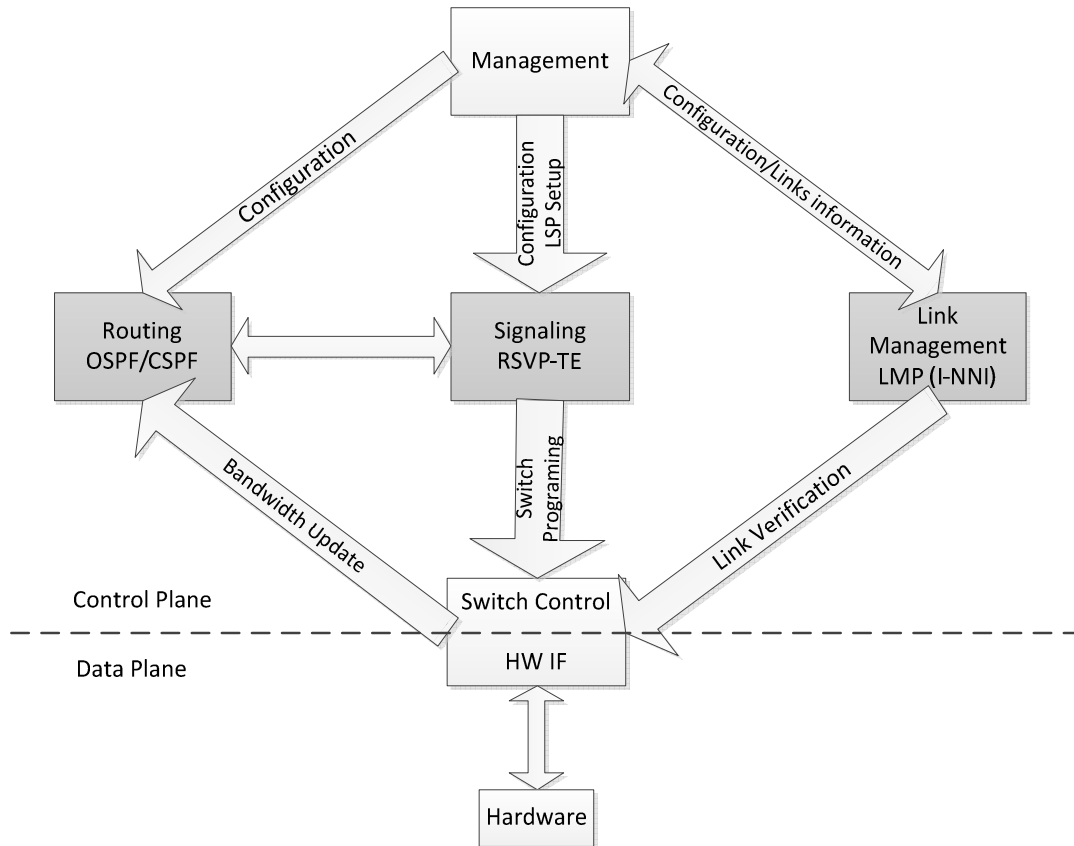
implicados en que una longitud de onda de entrada sea reenviada por un puerto distinto de salida o en el caso de ser el nodo destino, conduzcan la señal hacia el receptor óptico correspondiente.

En las redes de transporte el plano de datos y el plano de control están separados. La razón por la que las redes ópticas alcanzan tales velocidades es que no existe conversión electro-óptica en las conexiones intermedias de los LSPs. Es decir, no hay lectura de etiquetas, como en las redes de paquetes en cada salto, sino que el LSP ya está configurado desde su inicio. Para ello los datos de control, normalmente tienen asignados un canal propio a parte de los canales de datos, por ejemplo, en una red DWDM una *lambda* está asignada específicamente para el envío de señales de control entre nodos ópticos.

Ya hemos comentado que GMPLS se compone de una serie de protocolos que cumplimentan distintas funciones, estos protocolos son los siguientes:

- RSVP-TE
- OSPF
- LMP

A continuación la Figura 2-18 representa esquema de las funcionalidades que cumple GMPLS y la asociación y funcionalidad de sus distintos protocolos:



**Figura 2-18: Diagrama de funcionalidades del plano de control GMPLS [49].**

GMPLS tiene la función de cubrir las siguientes tareas[35]:

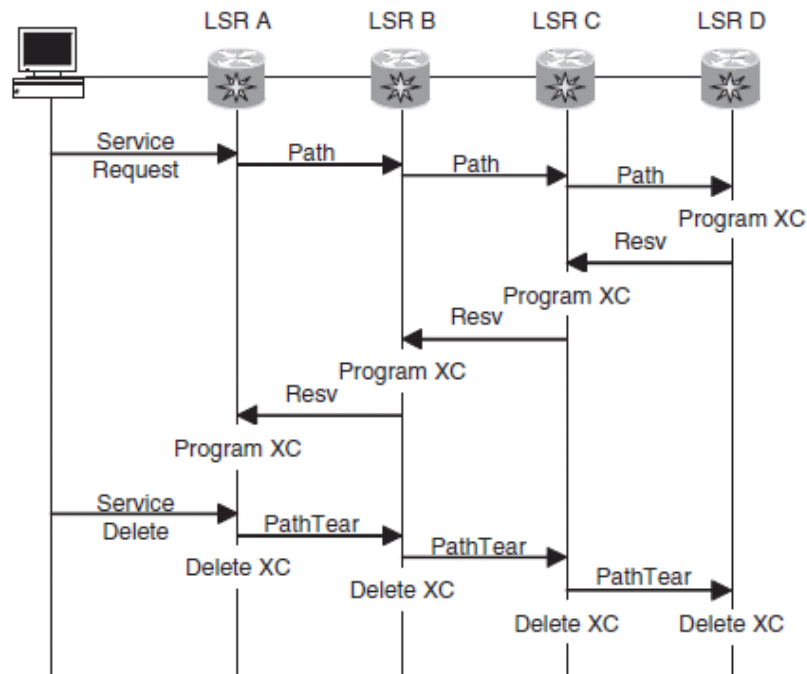
- Descubrimiento de nuevos nodos en la red. Cuando un nuevo nodo se añade a la red, los LSRs dentro del dominio intercambian mensajes para notificar al nuevo LSR información sobre el resto de la red.
- Intercambio de información del estado de los enlaces. Además de conocer la topología, cada LSR dentro de una red de transporte GMPLS debe conocer la información de la disponibilidad de recursos en todos los enlace, y guardarla en su correspondiente *Traffic Engineering Database (TED)*.
- Gestión de enlaces. GMPLS se encarga de gestionar la reserva de recursos en todos los enlaces pertenecientes a un nuevo *path* o LSP, de su establecimiento o su liberación, llegado el caso.
- Calculo de rutas para nuevas peticiones de servicio. Cada nodo dentro de la red, debe ser computacionalmente capaz de, mediante la información que dispone del estado de la red, ejecutar algoritmos para el cálculo de la ruta óptima hacia el destino, aplicando restricciones de ingeniería de tráfico.
- Señalización para el establecimiento de nuevos caminos, distribución de etiquetas para identificar el LSP o los recursos asociados al mismo

### 2.2.1.3 Señalización, RSVP-TE.

La señalización es el proceso de intercambio de mensajes dentro del plano de control para establecer, mantener o liberar caminos de datos dentro de la red. Estos mensajes conforman el protocolo de señalización. En GMPLS el protocolo que realiza esta función es RSVP-TE [33][34][35] (RSVP con extensiones de ingeniería de tráfico).

Los mensajes de señalización se intercambian entre entidades de control, que generalmente están ubicadas en el mismo nodo que el elemento de conmutación del plano de datos, sin embargo no es necesario que sea así. Un controlador puede estar físicamente separado del conmutador de datos (*data switch*) y comunicarse con sus controladores vecinos a través de un canal de control (*control channel*). Un *control channel* puede ser un enlace físico ó lógico a través de la red.

La elección de la ruta seguida por un LSP puede ser establecida por el plano de control sin ninguna restricción, en cuyo caso, el operador o la aplicación correspondiente especifica el destino únicamente. O también, el protocolo RSVP-TE proporciona la opción de establecer un camino especificando cada uno de los saltos en el plano de datos, mediante el envío de un objeto ERO o *Explicit Route Object*. En este caso, el operador puede pre-calcular el camino a seguir por un LSP basándose en restricciones de ingeniería de tráfico, estado de los enlaces, caminos disjuntos para canales de protección, etc.



**Figura 2-19: Intercambio de mensajes de señalización RSVP-TE para el establecimiento y liberación de recursos para un LSP[33].**



proponen extensiones a la [\[RFC 3209\]](#) y [\[RFC 3473\]](#) para incluir un nuevo parámetro de tráfico denominado SSON\_SENDER\_TSPEC en el que la etiqueta “m” cuantifica el número de *slots* consecutivos que conforman el LSP.

Estas extensiones serán detalladas en el capítulo 5.

#### **2.2.1.4 Enrutamiento, OSPF.**

OSPF [36][37](*Open Shortest Path First*) es un protocolo de enrutamiento englobado dentro del plano de control GMPLS. OSPF se encarga de la diseminación de información de la topología e ingeniería de tráfico (características y estado de los enlaces en cuanto a su utilización) a través de la red, para que cada uno de los controladores de la red pueda construir sus bases de datos de ingeniería de tráfico (TED).

Mediante la TED un controlador o nodo perteneciente al plano de control, puede realizar la computación de un *path* a través de la topología, conociendo el estado de disponibilidad de ancho de banda de los enlaces (*TE links*), el coste (distancia u otro parámetro que ponderé el coste de enrutar una petición a través de ese enlace) u otros parámetros de ingeniería de tráfico, como grupos de riesgos compartidos (SRLG). Esto permite, no solo calcular la ruta más corta entre dos nodos de la red, sino además, la posibilidad de calcular caminos de protección con rutas disjuntas para proteger el tráfico de un canal ante un posible fallo en la red.

Cada nodo o LSR es responsable de distribuir la información de todos los enlaces que terminan en él. Además, cada router debe redistribuir la información que le llega de otros router, para que todos los nodos de la red dispongan de la misma información en su respectivas TED. Para que los protocolos de enrutamiento puedan funcionar, cada nodo “descubrir” a sus vecinos y establecer una “*routing adjacency*”, un intercambio de mensajes sobre el estado de los enlaces. Estas tareas se realizan mediante el envío de mensajes de de saludo “HELLO” entre nodos vecinos.

El mensaje básico de intercambio de información en OSPF son los LSAs [41] (*Link State Advertisements*), estos mensajes son opacos para los routers de la capa IP, esta es una extensión de OSPF-TE para poder trabajar fuera de las redes IP.

Por último cabe mencionar que el protocolo ISIS-TE tiene las mismas funcionalidades que OSPF-TE y puede ser utilizado indistintamente en las redes GMPLS.

### **2.2.2 PCE**

El *Path Computation Element* (PCE) [4], es una entidad centralizada, encargada del cálculo de rutas a través de la red. El PCE es un elemento que surge como iniciativa del IETF para solucionar los problemas de enrutamiento en redes con múltiples capas de

transporte (*multilayer*) y con varios dominios (*multidomain*) [42], donde el cálculo de una ruta óptima excede las capacidades de los nodos en la solución distribuida OSPF.

Comparte funcionalidades comunes con OSPF, en cuanto al uso de una TED para el mantenimiento de la información de la topología y el estado de los enlaces, y en cuanto a la capacidad computacional de OSPF, pero la diferencia fundamental reside en que, a diferencia de OSPF, que es un protocolo de enrutamiento distribuido, el PCE es una única entidad centralizada, con mayor capacidad computacional y destinada únicamente al cálculo de rutas. Una de las principales virtudes del PCE es que es capaz de ejecutar distintos algoritmos de encaminamiento.

Sin embargo el PCE y el protocolo OSPF no son incompatibles, es más el PCE obtiene la información del estado de la red mediante los mensajes de inundación que proporciona OSPF mediante los mensajes que se envían entre nodos con el estado de los enlaces. Con esta información el PCE (que actuará como una entidad más dentro de la red y por tanto recibirá estos mensajes) rellenará la TED y actualizará en todo momento el estado de la red para que el cómputo de caminos sea acertado.

En las redes ópticas basadas en WDM el PCE utiliza algoritmos para resolver el problema RWA (*Routing & Wavelength Assignment*). En las redes elásticas, como veremos descrito en profundidad en la sección 1, el problema RSA es más complejo debido a la restricción de contigüidad, de los distintos *frequency slots* que conforman el canal en el espectro. Por ello, el PCE es un buen candidato para gestionar las tareas de planificación y enrutamiento en la red.

La arquitectura de un PCE está compuesta por tres elementos básicos: *Path Computation Client (PCC)*, *Path Computation Element (PCE)* y *Path Computation Element Protocol (PCEP)*[5]. En las redes basadas en el plano de control GMPLS, el PCC puede ser cualquier LSR del plano de control GMPLS, que quiera computar un LSP desde él mismo a un destino. EL PCC se comunica con el PCE mediante su correspondiente protocolo de comunicación PCEP, que está basado en el modelo de solicitud/respuesta. El PCEP se utiliza en la comunicación entre un cliente y un PCE o entre dos PCEs.

Para la recopilación de información necesaria para rellenar la TED del PCE, éste se basa en la información de OSPF sobre la topología y el estado de los enlaces.

#### **2.2.2.1 Arquitectura PCE**

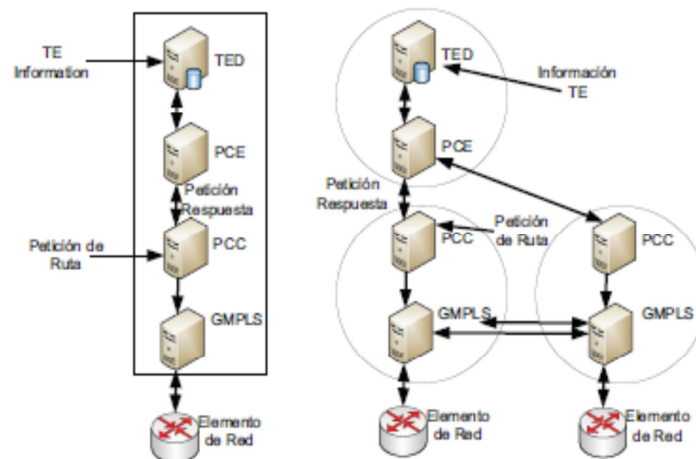
La arquitectura de un PCE se entiende como la localización y las entidades a las que está conectada dentro de la red. El PCE fue ideado como un elemento que pudiera facilitar el cómputo de rutas en entornos con múltiples dominios (*multidomain*) o capas de red (*multilayer*), por lo que su arquitectura varía en función del entorno en el que esté ubicado.

En el caso más simple, el PCE puede dar cobertura a un único dominio con una única capa de red. En este caso, la arquitectura consistiría en una serie de nodos GMPLS conectados



al PCE que actuarían como clientes del mismo (PCCs) y el protocolo de comunicación para el envío de peticiones al PCE desde estos “clientes”, el PCEP.

El PCE puede estar integrado en el mismo equipo que el PCC o estar en un servidor distinto del PCC. Estas dos arquitecturas se muestran en la Figura 2-21.



**Figura 2-21: Configuraciones integrada y separada del PCE con los elementos de red (PCCs)[38].**

#### 2.2.2.2 PCEP

El PCEP [5], es un protocolo basado en el modelo *Petición/Respuesta*. Es un protocolo que opera por encima del protocolo TCP y está basado en el establecimiento de una sesión entre cliente y servidor. PCEP se utiliza para la comunicación entre un PCC y un PCE, o entre dos PCEs.

Como se puede observar el establecimiento de una sesión para la obtención de una ruta a una demanda determinada se desarrolla en cuatro pasos:

1. **Fase de inicialización:** El PCC abre la sesión con un mensaje OPEN, al que el PCE, a su vez, responde con el mismo mensaje. Después se intercambian mensajes para cerciorarse de que la sesión sigue viva, dado paso a la segunda fase.
2. **Sesión *KeepAlive*:** Una vez iniciada la sesión por parte de los dos equipos involucrados, para el mantenimiento de dicha sesión se envían mensajes KEEPALIVE. Estos mensajes afirman que la sesión se mantiene activa y son necesarios para que no se pierda la comunicación entre ambas entidades.
3. **Request:** El mensaje *PCEPRequest* es el que emite una petición del cliente o de otro PCE, al PCE, para que inicie el cómputo de una ruta. Un mensaje *PCEPRequest* puede contener una o varias *Requests* incluidas en una lista

*RequestList*. Cada *Request* contiene un objeto *End-Points* en el que se especifica el nodo origen y destino de la petición, y un objeto llamado *Request Parameters*, que completa la petición con más información acerca de las características del camino a computar. Estas características pueden ser si el camino es bidireccional (objeto *Bidirect*), si la petición contiene más de una petición puede incluir un objeto *Svec* que relaciona el conjunto de peticiones marcando mediante banderas si existe alguna relación de protección entre ellas. También puede incluir un objeto *Bandwidth* (BW) en el que se especifica el ancho de banda demandado por la *Request*.

4. **Response:** El PCE envía la respuesta a la petición anteriormente recibida mediante el objeto Response. Este objeto incluye los siguiente objetos:

```

<response-list>::=<response>[<response-
list>]

<response>::=<RP>
                                [<NO-PATH>]
                                [<attribute-list>]
                                [<path-list>]

<path-list>::=<path>[<path-list>]

<path>::= <ERO><attribute-list>
where:

<attribute-list>::=[<LSPA>]
                                [<BANDWIDTH>]
                                [<metric-list>]
                                [<IRO>]

<metric-list>::=<METRIC>[<metric-list>]

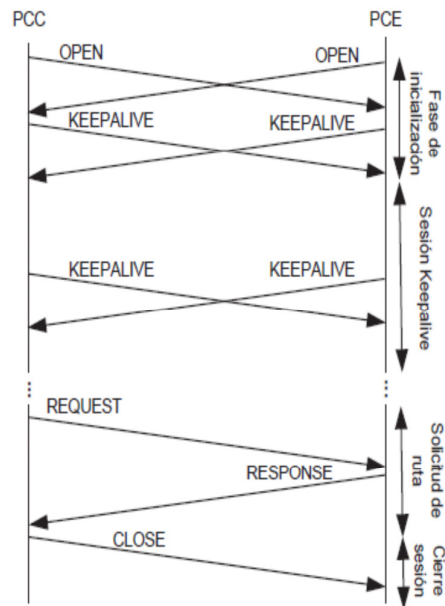
```

La response puede incluir la ruta seleccionada para dar servicio a la petición recibida, o responder que la no se ha podido encontrar una ruta disponible entre los nodos origen destino. El objeto NO-PATH es el indicado para este propósito, mientras que, si el cómputo de camino ha sido satisfactorio el objeto ERO, incluido en la *pathlist* es el encargado de detallar la ruta de inicio a fin mediante una lista de saltos.

Para el establecimiento de LSPs el objeto ERO incluye el subobjeto *End-Points* donde se describe las direcciones origen destino de cada salto, e intercalados entre estos, una etiqueta (*label*) que detalla el tipo de tráfico que contiene el LSP y (si es preciso) información relevante acerca de la configuración de los equipos para el establecimiento del LSP. Esta información en el caso de las redes WSON o Flexgrid será: el identificador del tipo de recursos que se está conmutando, la rejilla espectral y la lambda o frecuencia central del LSP.

5. **Close:** Por último el objeto CLOSE se utiliza para el cierre o finalización de una sesión PCEP.

El intercambio de mensajes correspondientes al establecimiento de una sesión está reflejado en la Figura 2-22:



**Figura 2-22: Intercambio de mensajes en una sesión PCEP.**



## 3 Algoritmos de planificación para redes elásticas

---

### 3.1 Algoritmos Routing & Spectrum Allocation (RSA)

En primer lugar conviene recordar que para generar *Elastic Optical Paths* (EOPs) el problema se divide en dos partes. Por un lado, la operación de enrutado (*routing*), cálculo de la ruta entre el nodo origen y el destino a través de la topología de la red; y por otra, la selección de los recursos espectrales que se asignarán a la petición –*Spectrum Allocation*– (SA), definidos por una frecuencia central y un ancho banda o de *slot* (*Slot Width*). Algunos algoritmos RSA están diseñados para ejecutar ambas operaciones simultáneamente.

En redes WSON (*Wavelength Switch Optical Network*) los algoritmos de planificación de enrutado y asignación de longitudes de onda (*Routing and Wavelength Assignment* - RWA), buscan una ruta física a través de la red y asignan una longitud de onda para el transporte de ese canal. La elección de esta longitud de onda está condicionada a que sea la misma en todos los enlaces de la ruta, para que, de esta manera, no sea necesaria la conversión electro-óptica de la señal en ningún salto de la ruta. Llamamos a esta condición, condición de continuidad (*continuity constraint*). Esta restricción es debida a la inexistencia de conversores de longitud de onda en los nodos de conmutación óptico. En las redes elásticas aparte de esta condición, se le une una nueva, la condición de contigüidad en el espectro (*contiguity constraint*). Esta condición estipula que los *frequency slots* que ocupe el canal deben estar juntos en el espectro. El motivo es similar al anterior, los elementos de conmutación de espectro no realizan cambios en la banda sino que únicamente pueden ajustar el puerto de salida y el ancho de espectro.

Para empezar podemos clasificar los algoritmos de planificación RSA según como llegan las peticiones en dos grandes grupos: algoritmos estáticos (*offline*); y algoritmos dinámicos (*online*).

#### 3.1.1 Offline RSA.

El primer caso contempla el caso de recibir una matriz de demandas de canales de capacidades variables. El procesamiento de las peticiones por tanto se hará como un conjunto. El cálculo de la solución óptima a este problema, que en general en la literatura [13][14] se presenta como un problema *NP-hard* y se computa mediante un *Integer Linear Programming* (ILP). El ILP es un método de programación matemática para la resolución de problemas complejos y la obtención de soluciones enteras óptimas.

Un ILP se describe como un conjunto de variables, una o varias funciones objetivo, que suelen ser la maximización o minimización de alguna variable, en el caso de las redes elásticas puede ser maximizar el número de *frequency slots* consecutivos dejados libres tras una petición, minimizar el número de saltos de una ruta, o minimizar la posición en el espectro del último *frequency slot* asignado a una petición. Y por último, un número de restricciones o condiciones que definen el problema.

El problema RSA se puede atajar como la resolución del enrutado y la asignación de espectro conjuntamente (*Joint RSA* [14]). Con este planteamiento del problema RSA, la mayor dificultad que se presenta, es el gran número de condiciones que plantea el problema. Esto introduce una mayor complejidad de cómputo a la hora de calcular el camino óptimo para cada petición optimizando a su vez la asignación de espectro, lo que al final se traduce en unos tiempos de computación del ILP demasiado grandes (>6 horas[33])

Vamos a comenzar con una definición formal del problema *off-line RSA* existente en la literatura [15]:

- Una red óptica elástica basada en *Flexgrid* puede definirse mediante un grafo  $G(V,E)$  donde  $V$  es el conjunto de nodos que conforman la red, y  $E$  el conjunto de enlaces que los unen.
- Cada enlace de la red se compone de una serie de *frequency slots*  $S=\{s_1, s_2, \dots, s_N\}$  donde  $N$  sería el número de *slots* en los que se descompone el espectro óptico utilizable de cada enlace.
- Un conjunto finito de demandas denotado como  $D$ , definidas mediante los nodos origen y destino ( $s_d, t_d$ ), y mediante el ancho de banda requerido  $b_d$ , y el número de slots necesarios para transportar la conexión  $n_d$ . En esta definición vamos a incluir, por simplicidad, la banda de guarda  $B$  entre dos canales contiguos dentro del número de slots  $n_d$ .

### Objetivo

Minimizar el ancho de banda rechazado.

### Resultado

Ruta para cada demanda a través de la topología dada, y asignación del espectro necesario para cada conexión.

### Notación

$V$  conjunto de nodos, índice  $v$ .  
 $E$  conjunto de enlaces, índice  $e$ .  
 $E(n)$  conjunto de enlaces que coinciden en el nodo  $n$ .

### *Demandas y caminos.*

- $D$  conjunto de demandas, índice  $d$ .  
 $P(d)$ : conjunto de caminos pre-definidos para la demanda  $d$ . Cada camino  $p$  está formado por una secuencia de enlaces  $e \in E$ .  
 $P$  conjunto de todos los caminos pre-computados,  $P = \bigcup_{d \in D} P(d)$ . Índice  $p$ .  
 $\delta_{pe}$  es igual a 1 si, el camino  $p$  contiene el enlace  $e$ .  
 $b_d$  ancho de banda de la demanda  $d$  en Gbps.

### *Espectro.*

- $S$  conjunto de *frequency slots*, índice  $s$ .  
 $n_d$  número de slots para la demanda  $d$ .

### *Variables de decisión*

- $x_d$  Binaria. Igual a 1 si la demanda  $d$  es rechazada 0 si es aceptada.  
 $y_p$  Binaria. Igual a 1 si el camino  $p$  es seleccionado, 0 si no.  
 $f_d$  Entero positivo que marca el índice del primer slot asignado de la demanda  $d$ .  
 $f_{d1d2}$  Binario. Igual a 1 si el índice del primer *frequency slot* de la demanda  $d_1$  es menor que el de la demanda  $d_2$ , es decir,  $f_{d1} < f_{d2}$ , y 0 si no.  
 $y_{ps}$  Binario. Igual a 1 si el slot  $s$  está asignado al camino  $p$ , igual a 0 si no.

Siguiendo la notación expuesta podemos definir la función objetivo como:

$$\Phi = \sum_{d \in D} x_d \cdot b_d$$

, la cantidad de ancho de banda no servido.

A continuación se va a formular una solución básica al problema SA ciñéndonos solo en satisfacer las condiciones de continuidad y contigüidad en el espectro.

Objetivo minimizar  $\Phi$ :

- (1)  $\sum_{p \in P(d)} x_d + y_p = 1 \quad \forall d \in D$
- (2)  $\sum_{s \in S} y_{ps} = n_d \cdot y_p \quad \forall d \in D, p \in P(d)$
- (3)  $\sum_{d \in D} \sum_{p \in P(d)} \delta_{pe} \cdot y_{ps} \leq 1 \quad \forall e \in E, s \in S$
- (4)  $-|S| \cdot (y_{ps} - y_{p(s+1)} - 1) \geq \sum_{s \in [s+1, |S|]} y_{ps2} \quad \forall d \in D, p \in P(d),$   
 $s \in [1, |S| - 1]$

La condición (1) comprueba que solo se asigne un posible camino a cada demanda. La restricción (2) asigna el número de *frequency slots* requeridos por cada demanda. En (3) se comprueba que cada slot este asignado como máximo a un camino. Y por último (4) establece la condición de contigüidad, asegurándose de que si un *frequency slot* está asignado a una demanda y el siguiente no, entonces todos lo siguientes *frequency slots* no están asignados a esa demanda.

Un segundo enfoque posible seria, estáticamente, efectuar las dos operaciones secuencialmente (R+SA). Es decir, primero generar las rutas óptimas para los distintos canales y a continuación efectuar los algoritmos para asignar el espectro óptico lo más eficientemente posible (no es posible encontrar la ruta óptima con las restricciones de SA en tiempos realizables).

### **3.1.2 Online RSA**

El caso dinámico u online, consiste en servir las peticiones dinámicamente según van llegando. Las peticiones de caminos se van ejecutando según llegan, es decir, la red se va ocupando conforme las peticiones se van sirviendo, por lo que no se obtendrá una solución óptima en este caso. La solución dinámica del problema RSA se plantea sobre todo para casos de restauración de un EOP, proceso que debe realizarse mientras el servicio se mantiene activo y debe realizarse en el menor tiempo posible. Otro posible caso de uso es la reasignación de recursos de un canal debido a algún cambio significativo en la red (la saturación de los recursos de determinados enlaces, la liberación de canales dando lugar a nuevas posibilidades de enrutamiento...) o la introducción de una nueva petición aislada de EOP cuando la red ya está en funcionamiento y el resto de las demandas servidas.

Por tanto, en esta segunda familia de algoritmos solo contemplaremos aquellos denominados heurísticos debido a su menor tiempo de computación. Estos pueden ser divididos en dos clases:



1. **One-Step Approach:** Donde las operaciones de *routing* y asignación de recursos espectrales se realizan a la vez. Algunos ejemplos de este tipo de algoritmos son:
  - a) *Modified Dijkstra's Shortest Path (MSP)*
  - b) *Spectrum-Constraint Path Vector Searching (SCPVS)*
2. **Two-Step Approach:** El problema RSA divide en dos partes: enrutado y asignación del espectro. En [28][29] primero se calculan  $k$  “*shortest paths*” utilizando el algoritmo de *Dijkstra* u otro algoritmo equivalente, y a continuación se utiliza uno de los siguientes algoritmos para la asignación del espectro:
  - a) *Lowest Starting Slot [28]:* Asigna la primera secuencia de slots disponibles que cumplan los requisitos de nuestro canal.
  - b) *Void Filling[28][30]:* Selecciona la ruta con los menos huecos consecutivos posibles. Esto sirve para que la fragmentación en el espectro sea la menor posible.
  - c) *First Fit:* Asigna la primera secuencia de slots disponibles que encuentra a nuestro canal.

Un factor importante a la hora de procesar las peticiones una a una es el orden en que llegan estas peticiones al algoritmo. Las políticas más utilizadas son: i) canales con mayor demanda de “*frequency slots*” primero; ii) canales con la ruta más larga primero; iii) una combinación de las dos anteriores.

### **3.2 Algoritmos RSA para tráfico variable en el tiempo.**

Un aspecto importante de las redes elásticas es su inherente flexibilidad en cuanto al ancho de banda que le asignamos a cada canal óptico. Esta propiedad permite que el ancho de banda del canal se pueda ajustar dinámicamente en función de la demanda que recibimos, es decir. Gracias a las redes elásticas los recursos espectrales pueden ser mejor aprovechados mediante una asignación del espectro más acorde a las necesidades reales de la red. Servicios de red muy focalizados a ciertas horas del día, como el video bajo demanda durante la tarde-noche, pueden requerir un gran ancho de banda que en otras horas no utilizan. Ese ancho de banda, podría ser utilizado durante el resto del día para otros servicios, proporcionando a los operadores de red un gran ahorro.

En este sentido la asignación del espectro, normalmente fija, durante todo el tiempo que el canal este asignado puede ir variando en cada periodo de tiempo en función de la demanda que tengamos en cada momento.

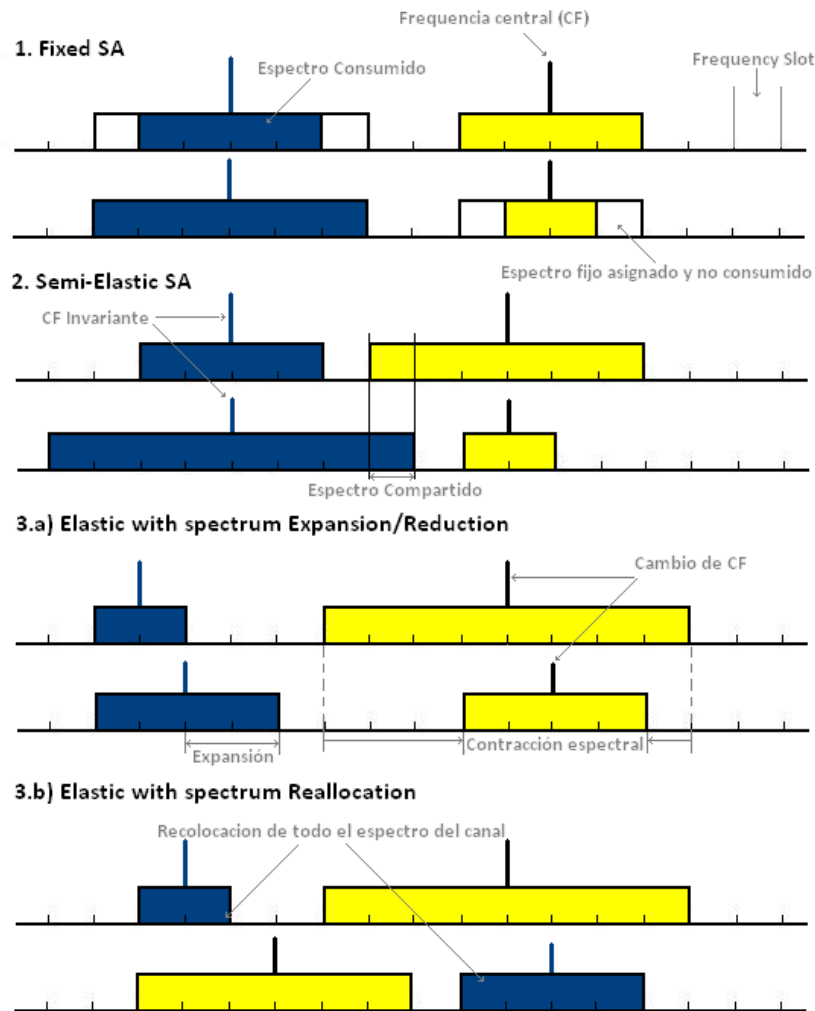
Dada una EON compuesta por una serie de nodos ópticos y de enlaces de fibra que los comunican entre sí. Esta red puede ser representada mediante un grafo de la siguiente manera:  $G(V,E)$ . Cada enlace de la red tiene una serie de *frequency slots* donde deben ser

asignados los distintos canales. En [13][15], se presentan tres posibles esquemas para resolver la asignación del espectro:

1. **Fixed SA:** Este es el caso básico. Se asignan una CF y su correspondiente SW fijas para cada canal a lo largo del tiempo. Las demandas podrán usar parte o todo el espectro asignado en cada periodo de tiempo pero nunca compartirán espectro con otros canales u otras demandas.
2. **Semi-Elastic SA:** La CF es fija pero la SW puede variar en cada periodo de tiempo. En este caso las ranuras del borde de los canales son compartidas entre los dos canales adyacentes, y se le asigna a uno o a otro en función de la demanda.
3. **Elastic SA:** Ambos CF y SW pueden variar en cada periodo de tiempo. Los canales compartirán espectro pero no se asignará el mismo *slot* a dos canales distintos en el mismo periodo de tiempo. Puede haber dos variantes de este esquema: *Elastic SA with spectrum Expansion/Reduction* and *with spectrum Re-allocation*.

3.a) *Spectrum Expansion/Reduction:* En este caso, el espectro compartido entre dos peticiones será como máximo, la anchura de espectro asignado al más pequeño de los dos canales. El movimiento de la CF está limitado al rango de frecuencias de la petición más ancha.

3.b) *Spectrum Re-Allocation:* Este es el caso menos restrictivo. Cualquier parte del espectro puede ser recolocado en otro espacio. Los movimientos de la CF no están limitados.



**Figura 3-1: Diferentes esquemas de asignación del espectro [15].**

La Figura 3-1 ilustra los distintos modelos de asignación del espectro, de arriba abajo los modelos van ganando en elasticidad, lo que aumenta la ganancia en ahorro de espectro pero también aumenta la complejidad de los algoritmos encargados de ejecutar estas técnicas. El caso de la re-colocación del espectro será expuesto en profundidad en una sección posterior.

### **3.3 RSA for Survivable Networks**

Para crear rutas alternativas en la red en el ámbito de las redes ópticas elásticas, es necesario crear algoritmos que apliquen las restricciones de RSA a la creación de rutas alternativas disjuntas que ofrezcan protección, y hagan más robusta la red.

En [7], se propone un algoritmo que proporciona RSA tanto para rutas normales y rutas de protección en el mismo rango de frecuencias. Partiendo de cada slot, se crea un grafo  $G(V, E)$  auxiliar que representa, todos los nodos  $N$  y enlaces  $E$  alternativos a la ruta normal, que tengan ese slot disponible. Si existe un número de slots consecutivos que puedan alojar la petición se agrega un nuevo enlace al grafo.

Una vez creado el grafo de rutas alternativas, usando *Suurballe's Algorithm* se pueden encontrar dos rutas disjuntas dentro del grafo.

### **3.4 Algoritmos RSA adaptativos a la distancia.**

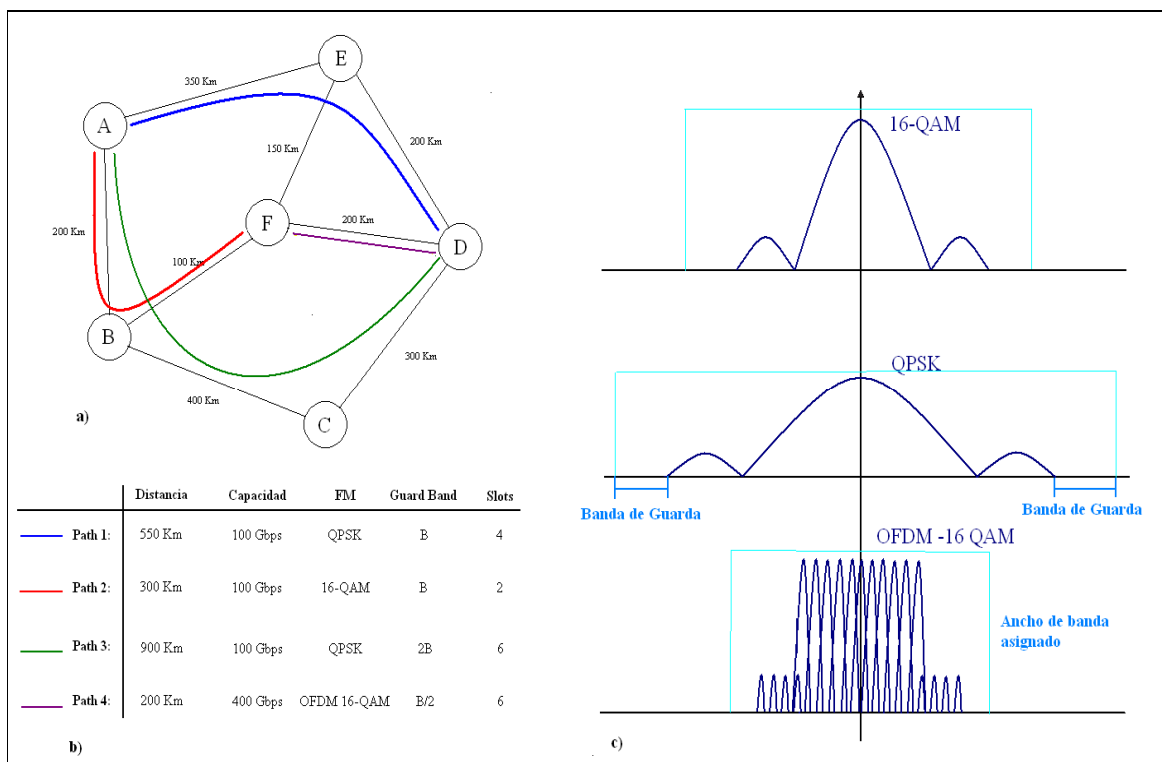
Tal y como hemos visto en el apartado 2.1.2, la eficiencia espectral del formato de modulación (FM) escogido para transmitir la señal condiciona en gran medida la eficiencia de red que obtenemos al asignar recursos a un canal de datos. En función de los parámetros físicos de la ruta elegida (distancia, OSNR, penalización por filtrado...) debemos seleccionar unos FM más o menos robustos, para poder transmitir los canales de información, libres de errores. Conociendo de antemano los parámetros de la ruta elegida se puede añadir un nuevo grado de flexibilidad a la red, permitiendo la elección de FM más eficientes para rutas cortas, y FM más robustas para rutas más largas.

Los conceptos clave para introducir flexibilidad a la red son:

- Para una misma tasa de datos, 16-QAM (ejemplo de FM eficiente) transporta el doble de bits por símbolo que QPSK (FM robusto), y por tanto ocupará la mitad de ancho de banda para la misma petición. Combinando distintos FM se puede ajustar uso de ancho de banda a las necesidades reales de transmisión.
- OSNR distinta para diferentes FM. Formatos más robustos (QPSK) – mayor protección contra ruido – mayor distancia de canal. Debido al mayor número de niveles de decisión, los puntos en las constelaciones en 16-QAM y 64-QAM, están más próximos lo que introduce una penalización [32] de 4dB y 8.5dB respectivamente, en la relación señal-ruido, en comparación con QPSK.
- Numero de saltos a realizar. Los filtros WSS que atraviesan las señales, introducen una degradación acumulativa en los bodes de los canales, limitando el número máximo de saltos a realizar. Esto implica añadir una banda de guarda adyacente a ambos lados del espectro del canal de información para protegerla de los efectos del filtrado. En función del número de saltos la anchura espectral de esta banda de protección también puede variar y no es necesario establecer un valor mínimo que garantice la transmisión efectiva del canal con el camino con más saltos.

La Figura 3-2 muestra un ejemplo de utilización de algoritmos de modulación adaptativa para la resolución del problema RSA de varios canales de información en la topología de ejemplo que se muestra en la imagen.

La utilización de la rejilla flexible y de distintos formatos de señal para la transmisión, permite efectuar un ahorro significativo en la asignación de recursos para los canales 2 y 4 del ejemplo. En ambos casos la longitud de los caminos o *paths* son relativamente cortos en comparación con los demás caminos lo que permite que la sensibilidad en recepción sea menor y por tanto se pueda utilizar el formato 16-QAM para la transmisión con la respectiva ganancia espectral que ello supone.



**Figura 3-2: a) Ejemplo topología de 6 nodos; b) Asignación espectral de 4 canales de datos de diferentes *bitrates* en *frequency slots* de 12.5 GHz en función de las características del *path*; c) Representación espectral de diferentes formatos de modulación y bandas de guarda.**

A continuación se recogen los distintos algoritmos RSA de adaptación a la distancia que se pueden encontrar en el estado del arte:

1. La primera proposición se encuentra en [31]. Se efectúa primero el algoritmo *Shortest Path* para el enrutado y *Lowest Starting Slot* para la asignación del espectro. Una vez calculadas las rutas, teniendo una función de la distancia de cada

ruta se asigna el FM en la fase de asignación de espectro. Esta solución encajaría con el formato R+SA (dos fases).

2. A *sequential distance-adaptive RSA ILP*. Propuesto en [9], es una extensión de lo propuesto en el apartado Offline RSA. Introduce nuevas restricciones, primero calcula las rutas junto con la selección del formato de modulación, y posteriormente asigna el espectro.

Se ha comprobado que la introducción de la asignación dinámica del formato de modulación supone una reducción de entre 9-60% en el espectro asignado, dependiendo de la red[30].

### **3.5 De-fragmentación de red y re-asignación del espectro.**

Debido a la asignación de espectro variable para distintos canales, el espectro tiende a fragmentarse y empiezan a aparecer huecos entre los distintos canales, que no pueden ser utilizados por ser demasiado pequeños y producen una reducción en el aprovechamiento del espectro y un aumento en el número de peticiones rechazadas. Además el estado de las demandas puede variar con el tiempo por lo que una re-asignación de los recursos espectrales puede aumentar drásticamente la eficiencia total de red.

Esto sugiere que una vez realizada la planificación, se pueden aplicar nuevos algoritmos que, mediante la re-asignación de los recursos espectrales en función del estado de la red, consigan minimizar la fragmentación. En [3], se proponen dos estrategias para efectuar esta operación: *periodic defragmentation* y *path-triggered*.

- *Periodic defragmentation*: Se basa en minimizar la fragmentación cada cierto periodo de tiempo. Requiere un tiempo bastante largo para efectuar toda la operación, ya que trabaja con todas las peticiones a la vez. Se suele efectuar durante periodos de poca actividad [10].
- *Path-triggered*: esta estrategia centra el problema en asignar espacio libre a una petición, cuando la red no puede ofrecérsela. Los canales involucrados para poder acomodar una nueva petición normalmente son un número limitado, por lo que la computación y cálculo de las nuevas rutas es más rápido que en *periodic defragmentation*.

#### **➤ SPRESSO (Spectrum Re-allocation Problem)**

A continuación se va detallar el algoritmo propuesto en [3]. Se trata de un algoritmo de reasignación del espectro basada en *Path-triggered*. Se ha incluido este apartado para detallar en mayor profundidad el problema de de-fragmentación a la distancia, ya que no se ha incluido ningún otro algoritmo de esta clase en el apartado 4.

El algoritmo computa todos los enlaces de una serie de rutas (*k-Shortest Paths*), y se comprueba que la cantidad de *slots* libres en cada enlace es igual o mayor al número necesario para satisfacer la petición entrante.

Si hay suficientes huecos, SPRESSO se activa y busca un conjunto de rutas ya establecidas, que compartan los enlaces seleccionados, para ser recolocadas dentro del espectro y así, dejar hueco para la nueva petición.

Para minimizar el retardo introducido, se introducen una serie de restricciones:

- i) Solo usaremos  $K=1$ , es decir, que sólo computará la ruta más corta en busca de huecos disponibles.
- ii) Los canales establecidos pueden ser recolocados pero sus rutas se mantendrán fijas.
- iii) Solamente estarán involucradas en la reasignación de espectro aquellas peticiones que compartan enlaces con la nueva ruta.
- iv) La longitud de una solución propuesta emitida por SPRESSO es limitada a un número máximo de recolocaciones.

A continuación se va a realizar una enunciación formal del problema mediante una formulación ILP:

#### *Datos del problema*

- Dada una topología de red, representada por un grafo  $G(V, E)$  siendo  $V$  el conjunto de nodos y  $E$  el conjunto de enlaces ópticos que conectan dos nodos.
- Un conjunto  $S$  de *frequency slots* disponibles en cada enlace  $e \in E$ .
- Un conjunto  $P$  de circuitos ya establecidos.
- Una nueva petición *newP* en la cual la ruta ya ha sido pre-elegida pero no hay una solución posible de asignación del espectro.
- El límite de *paths* establecidos que pueden ser recolocados.

#### *Función objetivo*

- Asignación de espectro para *newP*.
- Minimizar el número de *path* a recolocar.

#### *Notación*

$V$       conjunto de nodos, índice  $v$ .  
 $E$       conjunto de enlaces, índice  $e$ .  
 $E(p)$    conjunto de enlaces que conforman el *path*  $p$ .

### *Demandas y caminos.*

- $P$  conjunto de todos los caminos pre-computados,  $P = \bigcup_{d \in D} P(d)$ . Índice  $p$ .
- $P_m$  subconjunto de  $P$  con los caminos candidatos, incluyendo  $newP$ .  $P_m = P(newP) \cup \{newP\}$  a ser recolocados
- $P(e)$ : subconjunto de caminos que comparten el enlace  $e$ .
- $P(p)$ : subconjunto de caminos que comparten al menos un enlace con el *path*  $p$ .
- $$P(p) = \bigcup_{e \in E(p)} P(e)$$
- $C$  conjunto de canales, índice  $c$ . Cada canal consta de una serie de slots consecutivos.
- $C(p)$  subconjunto de  $C$  con aquellos canales que puedan ser asignados a  $p$ . Cada camino  $p$  y su correspondiente demanda  $d$  están relacionados de esta manera.  $C(p) \equiv C(d)$ .

### *Espectro.*

- $S$  conjunto de *frequency slots*, índice  $s$ .
- $S(p)$  conjunto de *frequency slots* asignados al *path*  $p$ .
- $n_d$  número de slots para la demanda  $d$ .

### *Variables de decisión*

- $\delta_{cs}$  es igual a 1 si, el camino  $p$  contiene el enlace  $e$ .
- $\omega_{pc}$  1 si el camino  $p$  está utilizando el canal  $c$ .
- $\eta_{es}$  1 si el *slot*  $s$  en el enlace  $e$  está libre, 0 si está ocupado.
- $\eta_{es(p,c)}$  Si la recolocación del *path*  $p$  al canal  $c$  es posible, esta variable devuelve  $\eta_{es}$ , sino devuelve 0.
- $maxR$  El número máximo de recolocaciones para una petición.
- $X_{pc}$  Binaria. 1 si el canal ' $c$ ' está asignado al *path* ' $p$ ', 0 sino.
- $y_p$  Binaria. 1 si el *path* ' $p$ ' ha sido recolocado, 0 sino.
- $r$  Entero correspondiente al número de caminos, ya establecidos, a recolocar.

**Objetivo:** Minimizar  $r$



$$\begin{aligned}
(1) \quad & r = \sum_{p \in Pm \setminus \{\text{newP}\}} y_p \\
(2) \quad & \sum_{c \in C(p)} x_{pc} = 1 \quad \forall p \in Pm \\
(3) \quad & x_{pc} - \omega_{pc} \leq y_p \quad \forall p \in Pm, c \in C(p) \\
(4) \quad & \sum_{p \in P(e)} \sum_{c \in C(p)} \delta_{cs} \cdot x_{pc} \leq \eta_{es} \quad \forall e \in E, s \in S \\
(5) \quad & r \leq \max R
\end{aligned}$$

La función objetivo minimice el número de caminos a recolocar, para que la nueva petición newP. La restricción (1) cuenta el número de caminos que necesitan ser recolocados. (2) asegura que se asigne un canal a cada *path* candidato, (3) establece si el *path* 'p' ha sido recolocado. (4) Asegura que cada *frequency slot* en cada enlace óptico, sea asignado a un *path* como máximo. Y por último, (5) limita el número de caminos a ser recolocados. Darse cuenta que solamente newP y aquellos caminos que compartan al menos un enlace con newP están dentro del conjunto de caminos candidatos a ser recolocados.

### 3.6 Traffic Grooming

Conceptualmente, consiste en agrupar flujos de datos más pequeños que compartan una dirección común en un canal mayor. Esta técnica, muy empleada en las redes IP, tiene como objetivo minimizar el equipamiento necesario para la transmisión. En el caso óptico, la agrupación de flujos permite la reducción en el número de transpondedores, así como en número de canales, lo que a la postre, implica una reducción en el número de puertos usados en los BV-OXC.

Esta posible agrupación puede permitir enviar varios canales juntos con uno o múltiples destinos, dentro de un *superchannel* desde un único BVT. La transmisión OFDM permite esta multiplexación de canales que, en saltos intermedios, pueden ser extraídos y reenviados hacia su destino mediante BV-OXC con una arquitectura interna de *Broadcast & Select* y añadir bandas de guarda a ese canal extraído para poder ser transmitido por el nuevo camino sin tener interferencia con otros canales.

Conviene aclarar, que para la agrupación de varios flujos ópticos en un mismo transpondedor, es necesario contar con una arquitectura *Sliceable* como la expuesta en el apartado 2.1.3.3.

### 3.7 Resumen de algoritmos del Estado del Arte

Algorithms	ILP	Heuristic	
RSA	ANT colony– Based RSA [46]	(RSA)	Modified Dijkstra Shortest Path (MSP) [44]
			Spectrum-Constraint Path Vector Searching (SCPVS) [44]
	Maximize Common Large Segment (MCLS) [45]	(R+SA)	KSP + Void Filling[20][28]
			KSP + Lowest Starting Slot (LSP)[28]
			KSP + Most Subcarriers First (MSF)
Distance-Adaptive RSA	Joint RMLSA [43] RML + SA [43]		KSP + First Fit (FF)
			Single demand RMLSA Heuristic [43]
			Simulated Annealing [43] (SimAn)
Spectrum defragmentation RSA	SPRESSO [3]	GRASP+PR [3]	
	Link Spectrum Compactness [47]		
	Network Spectrum Compactness [47]		
Time Varying RSA	Offline MH-RSA [13]	BRKGA (Genetic) [13]	
Optical Grooming		LSG, MTG [48]	

Tabla 3-1: Recopilatorio de algoritmos del estado del arte RSA.

## 4 Diseño de algoritmos de planificación para redes elásticas

---

En esta sección, detallaremos en profundidad los algoritmos desarrollados para la resolución del problema RSA en las redes elásticas basadas en Flexgrid.

Como ya hemos clasificado en anteriores secciones, los algoritmos RSA se pueden dividir en varias clases dependiendo de la función que desarrollen. En este proyecto han sido desarrollados tres algoritmos RSA, los dos primeros resuelven el problema RSA básico y el tercero incluye adaptación a la distancia, estos algoritmos serán los utilizados en la sección 1 para obtener las conclusiones y resultados finales de este proyecto donde se compararán las prestaciones de las redes elásticas con las ofrecidas por las redes basadas en rejilla fija DWDM. Los algoritmos que serán descritos a continuación se pueden aplicar a casos estáticos o dinámicos indistintamente.

La propiedad principal de las redes elásticas es la flexibilidad en la anchura espectral de los canales ópticos. Para ello, como definimos en la sección 2.1.1, se define una nueva rejilla espectral con una granularidad más baja (6.25 GHz) que permita seleccionar la frecuencia central del canal en múltiplos de esa cifra. Por otro lado se define la anchura de *slot* (*Slot Width*) como anchura espectral en múltiplos de (12.5 GHz), que puede tener un canal dentro del marco de las EONs. Es necesario por tanto proporcionar dos datos a la hora de definir la asignación espectral de un EOP, la frecuencia central que denotamos con la letra 'n', y el ancho de slot 'm'.

### 4.1 AURESSON

Este algoritmo es la adaptación del algoritmo RWA AURE [55], diseñado inicialmente para redes basadas en WDM, a la arquitectura de las redes elásticas y la tecnología Flexgrid. Pertenece a la familia de algoritmos heurísticos, donde cada petición es considerada aisladamente, y por lo tanto la solución que ofrece es individualmente válida pero no ofrece una solución óptima para todas las demandas de la red como conjunto.

Para cada conexión entrante AURE, utiliza el algoritmo *Dijkstra's Shortest Path* (DSP) para la operación de enrutado o *routing*, mediante el cual encuentra el camino más corto entre origen y destino en una topología dada. Para la asignación de longitudes de onda o *lambdas*, el algoritmo crea múltiples grafos pre-computados, que mantienen el estado de cada *lambda* en cada enlace. Es decir, si el cálculo de rutas se basa en una red óptica que utiliza la banda C del espectro y tiene habilitadas 80 longitudes de onda (o *slots* de 50GHz si nos referimos a la terminología del plano de control), el algoritmo deberá mantener 80 grafos pre-computados, para su ejecución.

El funcionamiento es el siguiente:

- Inicializamos el pre-cómputo del algoritmo con la topología y los detalles de la red (número de *lambdas*, rejilla espectral). Se crean los grafos pre-computados que serán utilizados para mantener el estado de ocupación de la red.
- Cada vez que llega una petición nueva, el algoritmo ejecuta *DSP* entre el nodo origen y destino de la nueva petición, en el grafo pre-computado correspondiente a la longitud de onda en la cual se está chequeando la disponibilidad de espectro en ese momento.
- Si el algoritmo DSP, encuentra un camino válido (*path*), se guarda la métrica de saltos de dicho *path*, así como la *lambda* elegida y el camino en sí.
- El algoritmo se ejecuta tantas veces como número de *lambdas* haya y, solo en caso de que la métrica del camino mejore la anteriormente guardada, se modificará la elección de *lambda* y *path*.
- Por último, una vez computadas todas las longitudes de onda del espectro, se eliminan los enlaces correspondientes al camino elegido, en el grafo correspondiente a la *lambda* seleccionada, y se envía la respuesta.

En la Figura 4-1 se muestra el pseudo-código de este algoritmo.

---

```
FUNCTION: AURE_Algorithm
|
INPUT: newRequest
OUTPUT: Response (PATH,LAMBDA)

1: [source, destination] = getEndpoints(newRequest);
2:  for each lambda in [0, numLambdas] do
3:     graphLambda = networkPreComputedGraphs(lambda)
4:     graphPath = DijkstraShortestPath (graphLambda, source, destination)
5:     if (graphPath == null) => lambda++
6:     else => metric = graphPath.getMetric()
7:         if (metric < MetricSaved) then => lambdaChosen = lambda
8:                                     metricSaved = metric
9:                                     noPath = false
10:                                    graphPathChosen = graphPath
11:  if (noPath == false) =>
12:    for i [0 : numberOfEdges in graphPathChosen] do
13:      removeEdge(networkPreComputedGraphs(lambdaChosen), edge(i))
14:    return [graphPathChosen, lambdaChosen]
15:  else => return [noPath]
```

---

Figura 4-1: AURE pseudo-código

Las extensiones necesarias para la conversión del algoritmo al problema RSA, pasan por la inclusión de la condición de contigüidad en el espectro de los *frequency slots* que conforman el canal de datos.

Al igual que en su versión RWA, el algoritmo mantiene un conjunto de grafos pre-computados. Sin embargo, en este caso al reducirse la granularidad, el número de grafos aumentará, ya que se mantendrá uno por cada posible frecuencia central. Para dictaminar claramente el significado físico de cada FS, representado en el caso de este algoritmo con un grafo, se establece que cada FS mantiene tanto el estado de disponibilidad de la correspondiente frecuencia central, así como el tramo de espectro que le sigue hasta la siguiente frecuencia central. Por lo tanto, un canal al menos deberá computar la contigüidad de dos frecuencias centrales disponibles para la asignación de un canal de 12.5 GHz (mínima granularidad).

Una vez aclarados estos términos, procederemos a la explicación del funcionamiento del nuevo algoritmo, así como de las extensiones realizadas.

- El funcionamiento del algoritmo es muy similar. En primer lugar se crean un número de grafos pre-computados, igual al número de FS.
- El algoritmo, cuando recibe una nueva petición, recibirá una información adicional, el ancho de banda requerido por la petición en Gbps o directamente el número de FS. El cálculo del número de FS se puede realizar indistintamente dentro o fuera del algoritmo, en función del marco en el que se ejecute el mismo.
- El algoritmo calcula la ruta entre origen y destino mediante DSP.
- Cuando encuentra una ruta, la guarda, e inicia un contador de *slots* consecutivos.
- En la siguiente iteración del algoritmo, se comprueba que el camino seleccionado sea exactamente igual al guardado anteriormente, y en dicho caso vuelve a aumentar el contador.
- Este proceso se repite hasta que el contador llegue al número de FS requeridos. En ese momento, el algoritmo, comprueba la métrica de la ruta seleccionada y la comprueba con las soluciones previas obtenidas, si se produce mejora, el nuevo camino será tomado como el camino elegido y tanto su métrica como la frecuencia central del canal serán guardadas.
- La frecuencia central se calcula como:  $(n_{\text{actual}} - m) + 1$ . (Nota: la granularidad de  $m$  y  $n$  son distintas).

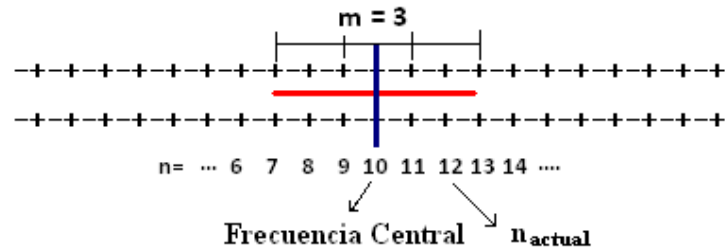


Figura 4-2: Ejemplo de asignación de espectro a un canal con AURE SSON.

---

```

FUNCTION: AURE_SSON_Algorithm
INPUT: newRequest
OUTPUT: Response (PATH, LAMBDA)

1: [source, destination, bw] = getEndpoints(newRequest);
2: [numSlots] = getNumSlots(bw);
3: for each CF in [0, numberOfCentralFrequencies] do
4:   graphCF = networkPreComputedGraphs(CF)
5:   graphPath = DijkstraShortestPath(graphCF, source, destination)
6:   if (graphPath == null) => CF++
7:   else => if (numberOfCosecutiveSlots == 0) then =>
8:     graphPathChosen = graphPath
9:     numberOfCosecutiveSlots++
10:   else => if (graphPath == graphPathChosen) then =>
11:     numberOfCosecutiveSlots++
12:     if (numCosecutiveSlots == numSlots) then =>
13:       if (metric < MetricsSaved) then =>
14:         CentralFrequency = CF - (numSlots/2) + 1
15:         metricsSaved = metric
16:         noPath = false
17:         graphPathTrullyChosen = graphPathChosen
18: if (noPath == false) =>
19:   for i [0 : numberOfEdges in graphPathChosen] do
20:     for j [0: numSlots]
21:       removeEdge(networkPreComputedGraphs(CentralFrequency-numSlots/2+j), edge(i))
22:   return [graphPathChosen, lambdaChosen]
23: else => return [noPath]

```

---

Figura 4-3: AURE SSON pseudo-código

## 4.2 KSP Channel-based

Este nuevo algoritmo utiliza otro enfoque para abordar el problema de la asignación de espectro variable. En [15], se introduce un nuevo concepto de ‘canal’ para simplificar el problema RSA *offline*. El enfoque consiste en asociar un EOP a un canal determinado, es decir a un conjunto de *frequency slots* contiguos que cumplimenten el espectro necesario a asignar a dicho EOP.

Los canales se pueden agrupar en función del número de *frequency slots* que vayan a ocupar. Es decir, se pueden agrupar todas las posibles combinaciones de un número ‘n’ de slots consecutivos dentro del espectro, como el conjunto de canales de granularidad N. Estos canales serían, para el caso de dos slots contiguos dentro de un espectro subdividido en diez slots:  $C_2 = \{0,0,1,1,1,1,1,1,1,1\}, \{1,0,0,1,1,1,1,1,1,1\} \dots \{1,1,1,1,1,1,1,1,0,0\}$ , por ejemplo.

La ventaja de utilizar este procedimiento es que una vez que la asignación de espectro queda asociada a la elección de un canal, la condición de contigüidad queda eliminada de la resolución del problema ya que, esta condición viene implícita en la creación del conjunto de canales. Esto repercute en una menor carga de computación en el algoritmo, y por consiguiente un mayor agilidad en el tiempo de ejecución del algoritmo.

El algoritmo utiliza el algoritmo *DSP* para el cálculo de la ruta óptima entre origen y destino. Sin embargo, para introducir el concepto de canal y la asignación de espectro en el cálculo de caminos, al algoritmo original han de introducirse nuevas restricciones, dando lugar a un nuevo algoritmo denominado *Modified DSP*.

Por tanto nuestro algoritmo RSA, generara por un lado, los canales representativos del espectro y mantendrá el grafo de la topología, en su función pre-computada; y, por otro lado, se valdrá de la función *Modified DSP* para obtener

El funcionamiento detallado del algoritmo es el siguiente:

- En primer lugar, se genera el conjunto de canales que van a ser usados para representar el espectro disponible. Los canales se generan en función del número total de FS’s en que está dividido el espectro, y en función del número de FS’s que ocuparán las peticiones.
- Si en general, el ancho de banda de las peticiones es aleatorio, se generarán un *array* de canales que comprendan desde el mínimo posible a asignar a un canal (12.5 GHz – 1 FS), hasta el máximo, que corresponde al número de FS’s que representan el ancho de banda de la petición más grande que vaya a soportar el algoritmo.
- Una vez generados los canales y creado una copia del grafo de la topología albergado en la TEDB del PCE, el algoritmo está preparado para comenzar a funcionar.

- El algoritmo recibe una petición con formato *PCEPRequest*. En primer lugar se obtienen los *Endpoints* (origen y destino de la *Request*) y se realiza la conversión entre el ancho de banda albergado en el objeto *Bandwidth* de la petición y el número de FS's correspondiente en función del formato de señal, la banda de guarda que se disponga entre canales y la sobrecarga introducida por los códigos FEC de corrección de errores.
- Una vez obtenido la fuente y el destino de la petición, y el número de FS, se llama a la función "*Modified DSP*". Esta se encarga de crear la ruta más corta posible entre el origen y el destino mediante DSP. El algoritmo de *Dijkstra*, sin querer entrar en profundidad en la descripción de su funcionamiento, crea un iterador con una serie de saltos correspondiente a la ruta más corta entre origen y destino. En el algoritmo original, únicamente se comprueba que el número de saltos sea el mínimo posible, y para ello se mantiene una métrica de la distancia desde cada nodo al nodo origen. En nuestro caso, para introducir la cuestión de la disponibilidad de espectro, se introduce una nueva condición y es que exista espectro disponible a asignar a nuestra petición en cada uno de los saltos de la ruta elegida.
- Para ello al iniciar el proceso, se crea una tabla, que en adelante llamaremos "*vertexSpectrumState*", con un *array* que contendrá el número de canales disponibles a asignar a la petición asociada al nodo en el que nos encontremos. Inicialmente, en el nodo origen, serán todos los canales posibles. El *array* es una combinación de 1's y 0's en el que se marca si el canal 'n' (posición número 'n' de nuestro *array*) está disponible u ocupado respectivamente.
- En cada nuevo salto se recibe el *vertexSpectrumState* acumulado de los saltos anteriores, y se comprueba el espectro del enlace. En función de la información del espectro, se van eliminando los canales que contienen posiciones ocupadas en dicho enlace, reduciendo así el número de posibles canales candidatos a ser asignados a nuestra petición. La siguiente ecuación define la estrategia anteriormente descrita:

$$\pi(e = (i, j)) = \begin{cases} 1 & \exists c \in C(p) : \eta_s(i) \cdot \eta_{es} = 1 \forall s \in S(c) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

, donde:  $\eta_s(i)$  corresponde al estado acumulado de las ranuras de frecuencia a lo largo del trayecto  $E(o, i)$ . (*VertexSpectrumState*)

$\eta_{es}$  es un parámetro que indicia si el *slot* 's' del enlace 'e' está libre u ocupado (1/0 respectivamente).

$C(p)$  representa el conjunto de canales que tienen una anchura suficiente para soportar la demanda de cada petición  $p$ .

$S$  representa el conjunto de *frequency slots* disponibles en cada enlace.

$S(c)$  indica los FS's que conforman el canal  $c$ .



- Una vez creada la ruta entre origen y destino, el algoritmo dispondrá, mediante la información guardada en el último salto *vertexSpectrumState*, del conjunto de canales que son viables para toda la ruta.
- Del conjunto de canales posibles, se utilizará la estrategia “*Lowest Starting Slot*” para elegir el canal. De él se obtendrá la frecuencia central, que junto con el número de FS’s y la ruta, componen la información que se devolverá al PCE en la respuesta (*PCEPResponse*).

### **4.3 KSP Distance-Adaptive Multifiber Spectrum Assignment (KSP-DA-MSA)**

Por último, introducimos este nuevo algoritmo *KSP Distance Adaptive Multifiber Spectrum Assignment (KSP-DA-MSA)*, que toma como base el algoritmo anterior *KSP-Channel-based* pero que incorpora dos funcionalidades importantes: a) adaptación del formato de modulación a la distancia recorrida por el canal, y b) permite la introducción de múltiples enlaces entre un mismo par de nodos. Esta característica responde a la problemática de un crecimiento en la infraestructura de la red para evitar bloqueo.

Este algoritmo pertenece a la familia de algoritmos RSA con adaptación a la distancia, detallados en el apartado 3.4. Las EONs y los transpondedores de ancho de banda variable (BVTs) permiten la transmisión de tasas de datos variables y de distintos formatos de señal. Esta característica permite ir un paso más allá introduciendo la adaptación del formato de modulación de la señal a la distancia de la ruta a recorrer.

En un escenario de red donde la longitud de las rutas es variable, aquellas rutas más cortas pueden ser transmitidas mediante un formato de modulación más eficiente, como DP-16-QAM, lo que permite aumentar aún más la eficiencia en el uso de los recursos de la red.

<b>Formato de modulación</b>	<b>Capacidad</b>	<b>EE</b>	<b>FEC</b>	<b>Banda de guarda</b>	<b>Distancia Máxima (Km)</b>
OOK	10	1	0.12	7	2200
DP-QPSK	40	4	0.12	7	2800
DP-16-QAM	40	8	0.12	7	800
DP-QPSK	100	4	0.12	7	2800
DP-16-QAM	100	8	0.12	7	800
OFDM-DP-QPSK	400	4	0.12	10	3560
OFDM-DP-16-QAM	400	8	0.12	10	800
OFDM-DP-QPSK	1000	4	0.12	10	3560
OFDM-DP-16-QAM	1000	8	0.12	10	800

**Tabla 4-1: Formatos de señal disponibles en el algoritmo adaptativo a la distancia[63][64].**

KSP-DA-MSA utiliza un gráfico con múltiples fibras entre cada nodo con el fin de estudiar la escalabilidad de la red, a través de la estimación anual de nuevas fibras, WSS y BVTs necesarios a introducir, a fin de acomodar las demandas entrantes.

El algoritmo utiliza el algoritmo KSP(con  $k = 3$ ) para el enrutamiento, y se basa en la solución basada en canales del algoritmo anterior para calcular la asignación de espectro. El caso de uso que motiva la implementación de este algoritmo es un escenario en el que el número de fibras paralelas entre nodos aumenta cada vez que una petición de servicio es bloqueada. Cuando es imposible encontrar un canal, para una demanda específica, la disponibilidad de recursos, de los enlaces dentro de la ruta fallida, es comprobada. En aquellos los enlaces con mayor ocupación, se introduce una nueva fibra.

Dividir el problema en dos: (1) de enrutamiento y, (2) la asignación de espectro, proporciona una solución más sencilla en la elección de la fibra por la cual enrutar la nueva demanda. Esto implica un aumento en el tiempo en de computación del algoritmo. Debido a que el escenario en el que se pretende utilizar este algoritmo es un escenario estático u *Offline*, el tiempo de computación no supone una restricción a la hora de abordar el problema.

El algoritmo toma la fibra con menos ocupación entre las soluciones posibles. Los pasos que sigue el algoritmo son los siguientes:

**KSP-DA-MSA:**

- (1): Se calculan los  $k$ -caminos más cortos, y la lista de nodos que atraviesan son enviadas al módulo de asignación de espectro (Spectrum Assignment Module - SAM).
- (2): SAM toma la lista de nodos de la primera ruta más corta, y comprueba la disponibilidad de canales ópticos (un canal óptico se define como un número contiguo frequency slots que acomodan el ancho de banda de la demanda, a través de toda la ruta).
- (3): El orden (número de frequency slots contiguos disponibles) del canal depende de formato de la señal de la portadora óptica que transportará la demanda. Inicialmente el algoritmo siempre elige el formato de modulación más eficiente disponible.
- (4): El número de posibles soluciones "asignaciones de espectro" crece con el número de saltos. Si  $n$  es el número de fibras paralelas y  $m$  el número de saltos, el número de posibles soluciones será  $n^m$ .
- (5): Se calculan todas las soluciones posibles. El criterio de selección de entre todas las opciones, es elegir los caminos más ocupados con el fin de maximizar la ocupación de la red, y retrasar en la medida de lo posible, la introducción de nuevo equipamiento en la red.
- (6): Cuando la "ruta física" ha sido elegida, se obtiene la distancia y los "physical impairments" de la ruta y se comprueba que la OSNR en recepción es mayor que la sensibilidad del receptor.
- (7): Si la ruta no cumple con los requisitos de sensibilidad se elige el siguiente formato de modulación disponible y se vuelve al punto (4).
- (8): Por último, si hay varias soluciones posibles, se utiliza la estrategia Lowest Starting Slot (LSS) para seleccionar el canal óptico donde asignar la solicitud.



## 5 Entorno experimental

---

### 5.1 Extensiones en el plano de control para redes elásticas

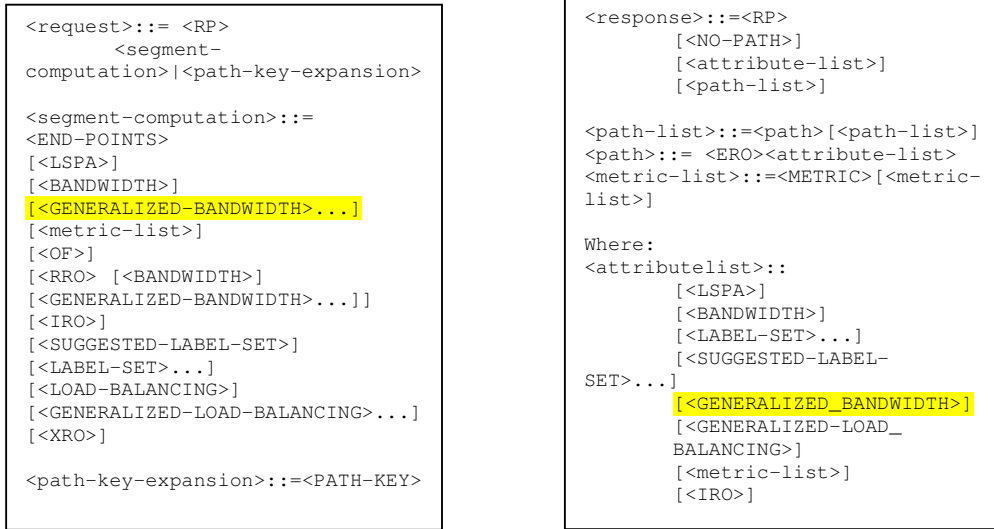
En esta sección se va a detallar el entorno experimental en que se han desarrollado los algoritmos descritos en la sección anterior. Empezando por el plano de control, en anteriores secciones hemos visto que el cálculo de rutas para redes elásticas, o la resolución del problema RSA, introduce nuevas restricciones en el cálculo y precisa además de nuevos campos de información para el posterior establecimiento de las rutas mediante el plano de control. Estas extensiones se centran básicamente en el protocolo PCEP, encargado de la comunicación entre el PCE y el cliente (nodo que envía la petición de servicio), en el protocolo RSVP-TE, encargado de la señalización y establecimiento del LSP, y en el protocolo OSPF-TE encargado del enrutamiento y diseminación del estado de los enlaces entre los nodos que conforman la red.

La diferencia fundamental entre las redes elásticas y las redes basadas en DWDM tradicionales, radica principalmente en la anchura espectral de los canales, donde pasamos de un ancho fijo de canal a un ancho variable que debe ser debidamente señalizado.

A la hora de realizar una petición de servicio al PCE, un nodo puede elegir solicitar un ancho de banda determinado. En este caso, en la creación del mensaje PCEP dirigido al PCE rellenará el objeto BANDWIDTH para introducir esta información.

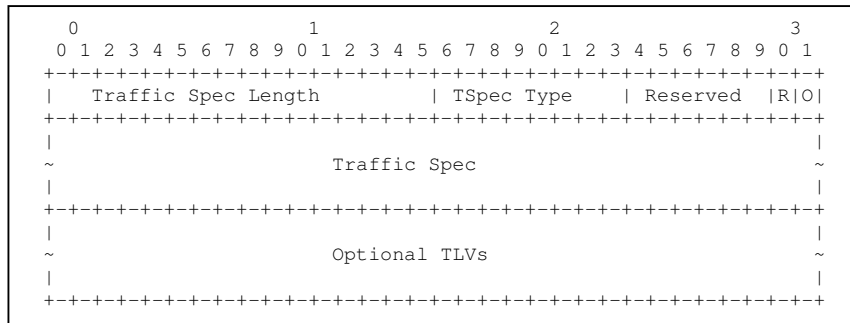
Posteriormente el PCE se encarga de la conversión BW a FS's y realiza el cálculo de la ruta y la asignación del espectro mediante algún algoritmo RSA. Sin embargo al crear la respuesta (mensaje *PCEResponse* definido en la [\[RFC5440\]](#)) el protocolo no contempla la emisión de ningún parámetro que tenga en cuenta el ancho espectral del LSP servido.

Para ello, el IETF en [52] ha introducido nuevas extensiones en el protocolo para incluir este nuevo parámetro. El objeto creado para este efecto es el denominado GENERALIZED\_BANDWIDTH que se enmarca en la *PCEPRequest* y en la *PCEResponse* tal y como se muestra en la Figura 5-1:



**Figura 5-1: Emplazamiento del objeto GENERALIZED\_BANDWDITH en la estructura de los objetos *Request* y *Response* del protocolo PCEP [52].**

Este nuevo objeto tiene la estructura mostrada en la Figura 5-2:



**Figura 5-2: GENERALIZED\_BANDWIDTH PCEPObject.**

Este objeto permite incluir en su campo *TrafficSpec* la etiqueta “m” donde se podrá definir la cantidad de *frequency slots* que conforman el LSP devuelto el en objeto *Response* del protocolo PCEP. Formalmente, el parámetro *TSpecType* especifica qué tipo de ancho de banda está representando el objeto. El *TSpecType* debe corresponder con el objeto RSVP-TE SENDER\_TSPEC (Objeto clase - 12). Esto indica que el campo *TrafficSpec* debe tener el mismo formato que el objeto correspondiente en RSVP-TE.

A continuación se muestra una captura de trafico local realizada con Wireshark, que muestra la comunicación entre un PCE y un cliente (en este caso la comunicación se realizó entre procesos dentro de la misma máquina). En la respuesta (desglosada) se

pueden observar el objeto GENERALIZED\_BANDWIDTH correctamente codificado en la respuesta enviada por el PCE al cliente (objeto PCEP\_RESPONSE).

The image shows a Wireshark packet capture of PCEP traffic. The filter is set to 'pcep'. The packet list shows several messages: two OPEN messages, two KEEPALIVE messages, a PATH COMPUTATION REQUEST MESSAGE, and a PATH COMPUTATION REPLY MESSAGE. The packet details pane for the selected REPLY message (Frame 25) shows the following structure:

- Frame 25: 146 bytes on wire (1168 bits), 146 bytes captured (1168 bits)
- Ethernet II, Src: 00:00:00\_00:00:00 (00:00:00:00:00:00), Dst: 00:00:00\_00:00:00 (00:00:00:00:00:00)
- Internet Protocol Version 4, Src: 127.0.0.1 (127.0.0.1), Dst: 127.0.0.1 (127.0.0.1)
- Transmission Control Protocol, Src Port: pcep (4189), Dst Port: pcep (44965), Seq: 17, Ack: 61, Len: 80
- Path Computation Element communication Protocol
  - PATH COMPUTATION REPLY MESSAGE Header
  - RP object
    - EXPLICIT ROUTE object (ERO)
      - Object Class: EXPLICIT ROUTE OBJECT (ERO) (7)
      - Object Type: 1
      - Flags
        - Object Length: 52
      - SUBOBJECT: Unnumbered Interface ID: 172.20.1.1:0
      - SUBOBJECT: Label Control
        - L=0 Strict Hop
        - Type: SUBOBJECT LABEL (3)
        - Length: 8
        - U=0 Downstream Label
        - Reserved: 0
        - C-Type: 2
        - Label: 28 00 00 02
      - SUBOBJECT: Unnumbered Interface ID: 172.20.1.2:0
      - SUBOBJECT: Label Control
      - SUBOBJECT: IPv4 Prefix: 172.20.1.6/32
    - GENERALIZED BANDWIDTH object
      - Object Class: GENERALIZED BANDWIDTH OBJECT (155)
      - Object Type: 5
      - Flags
        - Object Length: 12
        - Traffic\_Spec\_Length: 0x0004
        - Reserved: 0x0000
        - TRAFFIC\_SPEC: 0x000000200
      - SUBOBJECT: SENDER TSPEC
        - m: 0x0000004
        - m: 0x00

**Figura 5-3: Captura de tráfico protocolo PCEP.**

La Figura 5-3 muestra los mensajes del protocolo para el establecimiento de la conexión (OPEN, KEEPALIVE), a continuación una petición de ruta por parte del cliente (REQUEST) y por último la respuesta enviada por el PCE.

La respuesta está formada por un objeto RP – *Request Parameters* donde se especifican los parámetros de la ruta demandada como por ejemplo si es bidireccional, si forma parte de un conjunto de peticiones o si debe ser disjunta a otra ruta. Después viene un objeto ERO – *Explicit Route Object* que se compone a su vez de varios subobjetos. Entre ellos aparece el *Label Control* que es el encargado de transportar la etiqueta que identificara la frecuencia

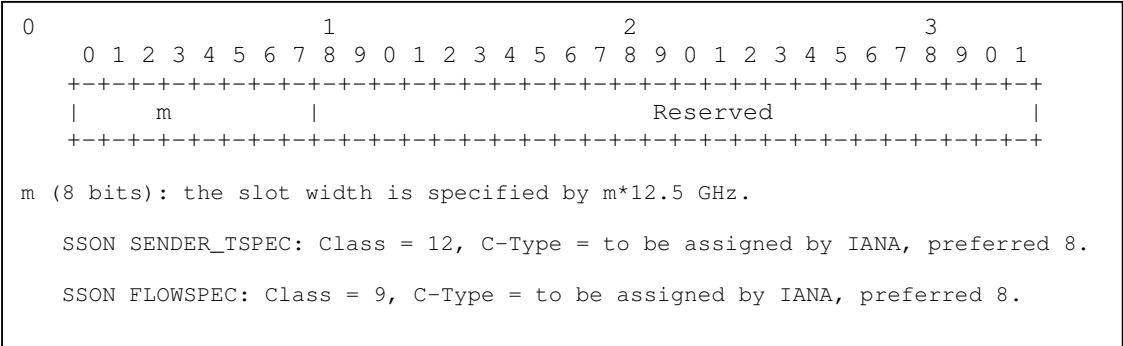
central de nuestro canal de datos ('n'). Por último, el objeto GENERALIZED\_BANDWIDTH en el subobjeto SENDER\_TSPEC contiene el segundo elemento fundamental para identificar un canal en las redes elásticas, el ancho de slot, la etiqueta 'm', que contiene el número de slots de 12.5 GHz que ocupa nuestro canal (en este caso 4 slots = 50GHz).

Para efectuar la reserva de recursos en la red, se utiliza el protocolo RSVP. Este protocolo también ha sufrido alguna modificación para incluir el ancho de slot en sus mensajes de reserva de recursos. En particular el objeto RSVP-TE SENDER\_TSPEC viene definido en [RFC 2110], y es un objeto que define de forma general el tipo de tráfico que genera la fuente del LSP. Este objeto está incluido en el objeto PATH y tiene los siguientes tipos:

Object	Type	Name	Reference
2		Intserv	[RFC2210]
4		SONET/SDH	[RFC4606]
5		G.709	[RFC4328]
6		Ethernet	[RFC6003]

**Figura 5-4: Tipos de objeto RSVP-TE SENDER\_TSPEC**

Sin embargo en [39], donde se especifican las extensiones del protocolo RSVP-TE para redes elásticas y Flexgrid, se define un nuevo tipo para el objeto SENDER\_TSPEC denominado SSON SENDER\_TSPEC que incluye la información del ancho de slot para redes basadas en rejilla flexible. El objeto tiene el siguiente formato:

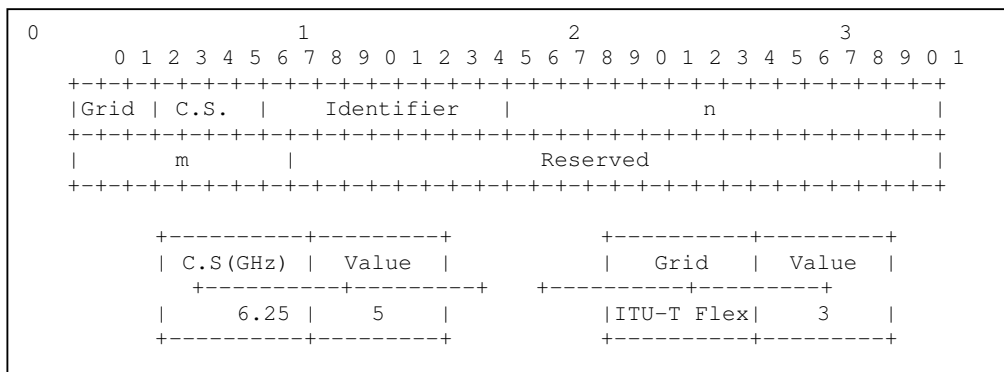


**Figura 5-5: Objeto SSON SENDER\_TSPEC.**

Por consiguiente, el objeto GENERALIZED\_BANDWIDTH representara la anchura espectral del LSP calculado en la respuesta devuelta por el PCE, y el objeto SSON\_SENDER\_TSPEC representará exactamente lo mismo pero en el protocolo RSVP-TE para efectuar el proceso de señalización y reserva extremo a extremo del LSP.



Para definir los recursos a conmutar en cada uno de los saltos que efectúa a lo largo de su ruta el LSP, el protocolo GMPLS intercambia una serie de etiquetas entre los nodos implicados. En el apartado 2.2.1.3 ya se definió la etiqueta utilizada en conmutación de longitudes de onda en redes WDM. Para el caso de las redes elásticas, en [53] un grupo de expertos del IETF definen una nueva extensión para incluir el ancho de slot (parámetro ‘m’) junto con la frecuencia central del LSP (parámetro ‘n’), en la etiqueta GMPLS. Asimismo se introducen dos nuevos valores para el parámetro ‘grid’ y ‘cs’ que completan el significado de la etiqueta introduciendo la nueva rejilla flexible y las nuevas granularidades de dicha rejilla. La estructura completa de la nueva ‘label’ definida para el intercambio de etiquetas en redes elásticas se muestra en la Figura 5-6.



**Figura 5-6: Formato y codificación de la etiqueta para redes ópticas basadas en Flexgrid (Flexi-label).**

## 5.2 Entornos de simulación.

El entorno de simulación en el que se han desarrollado las pruebas de ejecución de los algoritmos RSA implementados consiste en la ejecución de los mismos en una entidad PCE, ejecutándose dentro del Testbed de Telefonica I+D. Además, es necesario otro servidor que efectúe las operaciones de cliente (PCC). Las operaciones que se realizan en ambas entidades son las siguientes.

- El PCE servidor (en adelante PCEServer) es una entidad que funciona como un servidor TCP/PCEP que recibe los mensajes de petición de cálculo de caminos por parte del/los cliente/s, ejecuta los algoritmos de cálculo de rutas (RSA en el caso de las redes elásticas) y devuelve, un mensaje PCEResponse con la ruta calculada, al cliente.
- El PCC cliente actúa como cliente TCP/PCEP. Envía las peticiones y recibe las respuestas del PCE. Además, emula un nodo IP/MPLS que efectúa las operaciones del plano de control comprobando la efectiva disponibilidad de recursos para los LSPs devueltos por el PCE, su posterior establecimiento y liberación de recursos

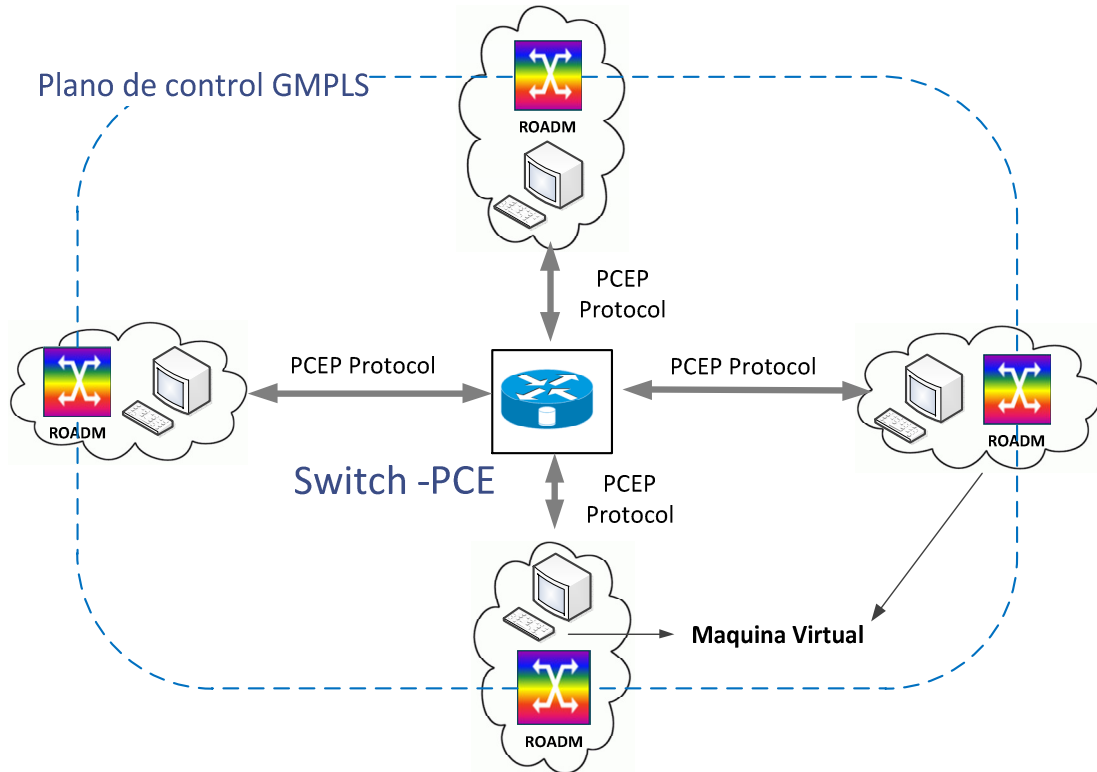
llegado el caso. También es el encargado de actualizar el estado de los enlaces en la TEDB del PCE, ya que en una red real, los nodos de la red enviarían mensajes OSPF a todo el resto de nodos comunicándole el estado de los enlaces, el PCE recibiría estos mensajes y actualizaría su TEDB. El PCE mantiene información sobre el estado de la red en el pre-computó de los algoritmos y adicionalmente puede guardar la información del estado de cada enlace en un campo de pre-Reserva donde se almacena el estado de los enlaces tras la ejecución de los algoritmos de cara a tener la información actualizada instantáneamente por si nuevas peticiones llegan antes de recibir los mensajes OSPF del plano de control. Dicha información no es definitiva hasta que los nodos devuelven un mensaje OSPF indicando que el establecimiento del LSP ha sido realizado correctamente, en ese momento la TEDB del PCE se actualizara con el nuevo estado de la red.

El entorno emulado GMPLS + PCE proporciona una idea más o menos clara de cómo funcionaría el plano de control de una red real. Las extensiones realizadas y las pruebas posteriores muestran que la implementación de las redes elásticas, desde el punto de vista del plano de control, es perfectamente realizable.

Las extensiones del plano de control han sido probadas en una emulación de la Malla Fotónica Express de Telefónica España [54]. Para dicha emulación se ha instalado una entidad de nodo ROADM emulado en cada una de las 30 máquinas virtuales empleadas para dicho propósito. Cada uno de estos nodos realiza las operaciones propias de un nodo GMPLS:

- Actúa como cliente PCEP emitiendo las peticiones de ruta que tengan como origen al propio nodo. Emite una *PCEPRequest* hacia la entidad centralizada PCE que tiene toda la información de la red. El PCE devuelve la ruta y la asignación de recursos espectrales en una respuesta PCEP (*PCEPResponse*).
- Al recibir la respuesta, el nodo se encarga de enviar los mensajes del protocolo RSVP-TE para realizar la reserva de recursos en la red.
- Si la ruta ha sido establecida correctamente, el nodo recibirá el último mensaje de la cadena de mensajes RSVP, y enviara una respuesta OSPF a todos los nodos de la red y al PCE para señalar que la ruta ha sido establecida correctamente.
- Gestiona la ocupación de los enlaces adyacentes al nodo. Mantiene una mini TEDB que incluye la información de la parte de la topología conectada al nodo (enlaces adyacentes al nodo). Si la ruta enviada por el PCE indica reservar recursos que ya están ocupados, enviara un mensaje OSPF al resto de la red indicando que dichos recursos ya están ocupados. Dicho mensaje será recibido por el PCE que actualizara el estado de los enlaces en su TEDB con la información del estado real de la red.

Por último indicar que los nodos emulados pueden procesar peticiones de rutas WDM o Flexgrid indistintamente, gracias a que han sido implementadas las extensiones para elegir el ancho de banda que ocupa un canal de forma flexible en todos los protocolos implicados.



**Figura 5-7: Diagrama simplificado de red emulada con plano de control GMPLS + PCE.**

Las prestaciones del entorno definido durante este capítulo, tanto las extensiones desarrolladas en los protocolos GMPLS y PCEP para la introducción del Flexgrid, como el escenario emulado en si han sido puestos a prueba en el desarrollo del trabajo llevado a cabo para la realización de la publicación que aparece en el A.B con el título “*Experimental Demonstration of H-PCE with BPG-LS in elastic optical networks*”. Adicionalmente los algoritmos utilizados para la resolución del problema RSA en el entorno de la red SSON han sido los descritos en el capítulo 4..



## 6 Evaluación de prestaciones

---

### ***6.1 Estudios de planificación estática en redes Elásticas y comparación de rendimiento con redes WDM.***

Gracias a los algoritmos desarrollados para la resolución del problema RSA, se puede estudiar bajo las mismas condiciones el rendimiento la máxima capacidad que, bajo las mismas condiciones, se pueden obtener con la introducción de la rejilla flexible con respecto al escenario con rejilla fija de 50GHz.

En primer lugar conviene recordar los beneficios teóricos que ofrecen las redes elásticas con respecto al caso tradicional de conmutación de longitudes de onda.

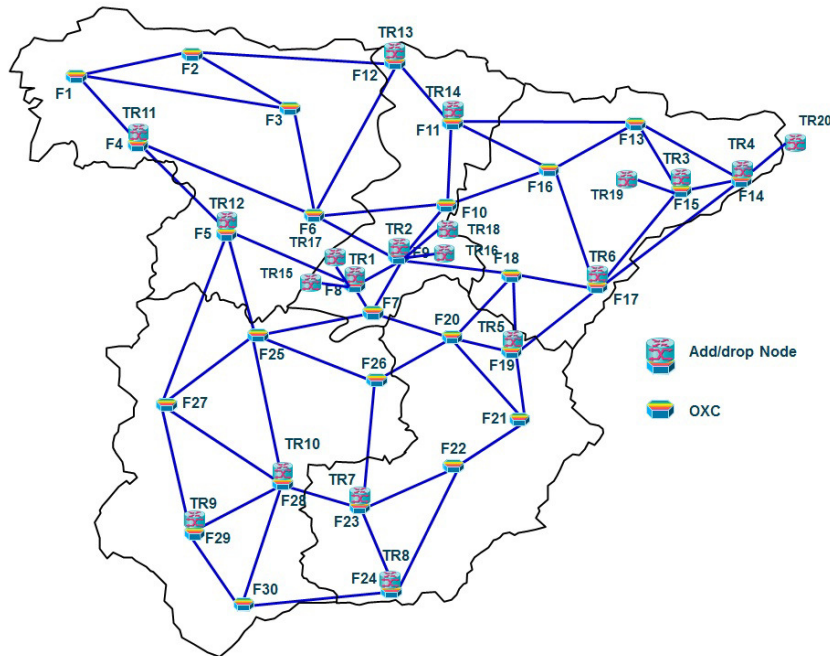
En las redes elásticas el ancho de banda no está ajustado a un ancho fijo sino que puede variar dentro de una cierta granularidad (12.5 GHz en todos los estudios realizados en este proyecto), por lo que se puede explotar la eficiencia espectral ofrecida por distintos formatos de modulación de una manera mucho más óptima. Como se recoge en la tabla 2.1, un canal de 10Gbps bajo la rejilla estática siempre va a ofrecer una eficiencia espectral de 0.2 bits/Hz independientemente del formato de modulación o el formato de señal con que se transmita la información. En cambio, bajo la rejilla flexible y utilizando formatos de modulación con alta eficiencia espectral como DP-QPSK (4 bits/símbolo) es posible asignar un canal de 10Gbps a un único *slot* de 12.5 GHz obteniendo así una eficiencia espectral de 0.8 bits/Hz. Este principio se puede aplicar a cualquier tipo de conexión obteniendo diferentes grados de mejora en función del ancho de banda elegido.

Por lo tanto, en este estudio vamos a comprobar si esta ganancia teórica es extrapolable a la planificación de una red completa en términos de capacidad máxima ofrecida.

#### **6.1.1 Características y marco general del estudio.**

En primer lugar, se va a describir el marco en el que se ha desarrollado el estudio. Este marco queda caracterizado principalmente por la topología de red considerada para el estudio, el la capacidad y características de señal utilizadas para transmitir el tráfico generado, y la distribución de trafico elegida.

La red elegida para el estudio se trata de la malla fotónica de Telefónica en España que se puede ver en la Figura 6-1.



**Figura 6-1:a) Topología Red de Telefónica España**

El tráfico generado sigue una distribución basada en el tráfico real dentro de la malla nacional de Telefonía España. Esta distribución se obtiene normalizando la demanda total de tráfico entre cada par de nodos de la red sobre la demanda total de tráfico sobre toda la red. Se suponen todas las conexiones bidireccionales.

Al margen de la distribución de tráfico es necesario concretar los formatos de señal utilizados para la transmisión de los canales de datos, las características del plano de control y el tipo de tráfico generado.

- (1) Generación de demandas estática. Secuencial, no hay distribución probabilística del tiempo entre llegadas. Tiempo de servicio infinito, ya que el estudio medirá la capacidad máxima de la malla y por tanto mantendremos todos los LSPs establecidos hasta el final.
- (2) Plano de control:
  - WSON: 50 GHz ITU-T grid 80 lambdas.
  - Flexgrid: 12.5 GHz grid 320 slots.
- (3) Tipos de conexiones y formatos de señal asignados:

Demanded channel	SSON (Flexi-Grid)			WSN (Fixed 50 GHz Grid)			Gain
	Modulation format	m	S (spectrum)	Modulation format	lambdas	S (spectrum)	
10Gbps	NRZ-OOK SE=1bit/symbol GB=7GHz	2	25 GHz	NRZ-OOK SE=1bit/symbol GB=7GHz	1	50 GHz	100%
40Gbps	DP-QPSK SE=4bits/symbol GB= 7GHz	2	25 GHz	DP-QPSK SE=4bits/symbol GB= 7GHz	1	50 GHz	100%
100Gpbs	DP-QPSK SE=4bits/symbol GB= 7GHz	3	37.5 GHz	DP-QPSK SE=4bits/symbol GB= 7GHz	1	50 GHz	33.3%
400Gbps	OFDM-DP-QPSK SE=4bits/symbol GB= 7GHz	10	125 GHz	DP-QPSK SE=4bits/symbol GB= 7GHz	4	200 GHz	60%

**Tabla 6-1: Tipos de conexiones, formatos de señal y ganancia del Flexgrid respecto a rejilla fija.**

La Tabla 6-1 recoge los tipos de conexiones que van a ser utilizados en este estudio. Para cada velocidad de transmisión la tabla recoge una serie de datos que caracterizan el formato de señal utilizada para la transmisión. Los datos han sido obtenidos de distintas fuentes [29][60] . A continuación se procederá a explicar el significado de cada uno de los distintos parámetros que aparecen en la tabla:

- *Formato de modulación:* Para cada tipo de conexión se especifica con el acrónimo el formato de modulación implementado para la transmisión de cada señal.
- *Eficiencia Espectral (EE):* Expresada en bits por símbolo, representa el número de bits que se pueden decodificar en cada símbolo recibido. El formato de modulación impone la EE que tiene cada señal.
- *Banda de guarda:* Este parámetro representa el espaciado que se debe dejar entre canales (al margen de espectro consumido por cada uno de ellos). Esto es necesario debido a la imperfección de los filtros (respuesta no ideal en los bordes del filtro) que atravesaran los canales en sus rutas hacia su destino. El valor asignado corresponde al cálculo de la degradación de OSNR que sufre una señal DP-QPSK al atravesar 6 WSS en cascada. En [20], se obtuvo una reducción de 13.5 GHz en la banda útil (caída de 3dB en el valor de OSNR de la señal) de una señal de 100Gbps al atravesar 10 filtros en cascada. En este estudio hemos reducido la banda a 7 GHz

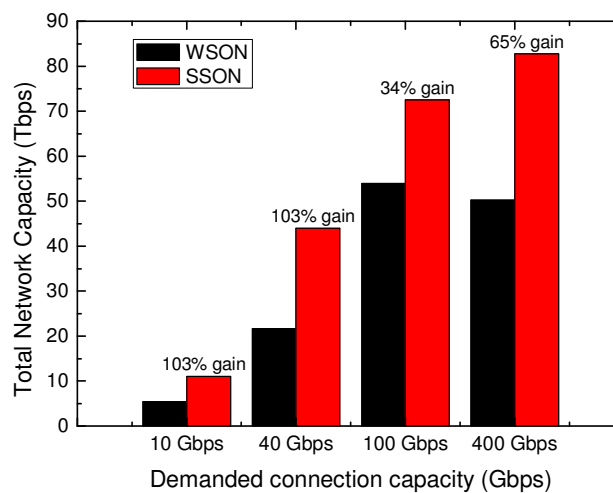
al considerar que la longitud media de las rutas es en torno a 4 saltos y el valor máximo es de 8 saltos.

- *Forward Error Correction (FEC)*: Este valor representa el factor de redundancia que se añade a la carga útil del canal para introducir códigos de corrección de errores (FEC). Para calcular la tasa de datos enviada real, se multiplica la tasa de datos útil por el valor (1+FEC), resultando la tasa de datos real.
- *Channel Spacing (CS)*: Espaciado mínimo entre canales, o granularidad de la rejilla espectral. Este valor nos indica el tamaño del slot.
- *NumSlots*: El número de slots (Flexgrid), junto con su granularidad (expresada entre paréntesis), representa el espectro real reservado por el plano de control para ubicar el canal óptico. La siguiente ecuación muestra el cálculo realizado para obtener el número de *slots* en función del ancho de banda demandado.

$$Num_{slots} = ((Bw * (1 + FEC)/EE) + BandaGuarda)/CS$$

### 6.1.2 Resultados del estudio.

Los resultados de las simulaciones se muestran en la Figura 6-2. Las barras negras indican la capacidad máxima de la red de Telefónica de España en Tbps red, siguiendo el perfil de la distribución del tráfico actual, utilizando la arquitectura con rejilla fija de 50 GHz. Las barras rojas muestran la capacidad máxima de la red para el caso Flexgrid, y en la parte superior de la barra roja se muestra el aumento de la capacidad con respecto al caso de la red fija. Los resultados muestran que, usando un formato de modulación DP-QPSK, la capacidad obtenida mediante la inclusión de la rejilla flexible es un 34% mayor utilizando conexiones de 100 Gbps, o en un 65% en el caso de conexiones 400 Gbps. Es importante destacar que una conexión de 400 Gbps es mapeada en cuatro lambdas que transportan 100 Gbps en el caso de rejilla fija, y utilizando multiplexación inversa en el caso Flexgrid.



**Figura 6-2: Ganancia de capacidad con Flexgrid y capacidad total enrutada.**



Con el fin de validar los resultados de la simulación, se ha desarrollado un modelo teórico para calcular la ganancia. La capacidad de la red total viene dada por la ecuación (1), donde  $N$  es el número total de enlaces,  $L$  es el espectro total disponible por enlace (típicamente 800 GHz),  $H$  es la media del número de saltos de las conexiones,  $S$  es el espectro reservado para conexiones y  $E$  es la eficiencia espectral del algoritmo de enrutamiento y asignación de longitud de onda (o espectro) (RSA/RWA). La ganancia en capacidad en Flexgrid, asumiendo la misma eficiencia y la media de número de saltos, vendría dada por:

$$(1). \quad C_{network} = \frac{N \cdot L}{H \cdot S} \cdot E \quad (2). \quad G_S = \frac{S_{SSON}}{S_{WSON}}$$

Así, los resultados de capacidad brutos del estudio y la ganancia, analítica y obtenida en la simulación se recogen en la Tabla 6-2:

Conexiones (Gbps)	Capacidad total servida (Tbps)		Ganancia (Flexgrid/WSON)	
	SSON	WSON	Analítica	Simulación
10	10.990	5.413	100%	103%
40	43.939	21.611	100%	103%
100	72.536	53.995	33,3%	34%
400	82.764	82.764	66,6%	65%

**Tabla 6-2: Ganancia y datos de capacidad total obtenida en Flexgrid y WSON.**

La comparación entre la ganancia en caso analítico y el simulado, muestra que los resultados obtenidos se aproximan mucho a la estimación teórica. Por lo tanto, se puede afirmar que la ganancia obtenida en Flexgrid no se ve afectada por una mayor fragmentación en el espectro que en el caso de rejilla fija, ya que si no, obtendríamos una menor ganancia. Este hecho es consistente con el hecho de que se utilizase el mismo algoritmo en ambos casos (AURE) con las diferencias inherentes a la arquitectura de red que ya se explicaron en el apartado 4.

Una vez estudiada la ganancia espectral obtenida con la introducción del Flexgrid, se intentará dilucidar si este factor es lo suficientemente determinante como para promover un cambio en la arquitectura de red con los costes que esto conllevaría. Para ello se ha realizado un segundo estudio sobre la evolución y los costes de la red comparando varios casos que combinan Flexgrid y la arquitectura actual basada en rejilla fija.

## **6.2 Estudio de migración de una red WSON a una red elástica**

Este estudio tiene como objetivo comparar las distintas estrategias de despliegue para una red elástica. Se va a realizar una comparativa de la evolución, en términos de equipamiento necesario a desplegar, de una red con un crecimiento de tráfico uniforme del 30% a lo largo de los próximos años, entre varios modelos evolutivos de la red DWDM actual ya desplegada hacia una red completamente elástica.

El estudio se centra en tres distintos modelos evolutivos de red:

- Continuación con la arquitectura WSON inicialmente ya desplegado (coste inicial 0), con conmutación fija de longitudes de onda y con capacidad para establecer canales de hasta 100Gbps.
- Despliegue inmediato de una nueva red elástica SSON que inicialmente pueda reutilizar parte de la infraestructura (filtros WSSs con capacidad de conmutación flexible activable mediante software, p.ej. LCOS) ya desplegada para la red de conmutación fija. En este modelo desde el principio se explotan todas las virtudes del Flexgrid, por lo que servirá para obtener los beneficios reales que aportará la conmutación óptica elástica sobre la conmutación fija modelada en el caso 1.
- Por último estudiaremos la posibilidad de una migración gradual de la red basada en DWDM a una red elástica SSON basada en Flexgrid, que aproveche hasta el límite de su capacidad la red fija heredada. Este modelo representa el caso en el que la tecnología desplegada (filtros WSS tipo MEMS) no tiene la capacidad de conmutación flexible ni capacidad de conversión. En este caso, por tanto se observará el caso en el que dado el punto en que la red WSON comience a no disponer de recursos espectrales se comenzará a desplegar nuevas fibras y equipo de conmutación flexible, siguiendo una estrategia de migración paulatina y gradual.

Los objetivos del estudio es comparar las ganancias de la red flexible en cuanto a equipamiento óptico necesario para su funcionamiento. Se espera obtener el año en el que los distintos casos necesitan incluir equipamiento nuevo (tiempo de vida de la red) y comparar la ganancia del Flexgrid en este ámbito. También se espera obtener el gasto al final del estudio de las tres alternativas en términos absolutos y, de alguna manera comparar el crecimiento de gasto en distintos tramos del estudio.

### **6.2.1 Condiciones iniciales del estudio**

El estudio parte inicialmente de una matriz de tráfico similar a la que existe en la red nacional de Telefónica y que recoge la demanda de tráfico existente en el año 2012. El estudio prevé un crecimiento anual de tráfico del 30%, y en base a estos datos se realiza anualmente la provisión de la demanda creciente en función de la capacidad de transmisión disponible cada año.

Actualmente, las conexiones ópticas DWDM ya desplegadas en la malla óptica nacional de Telefónica, utilizan la tecnología *On/Off Keying Non-Return-Zero* (OOK-NRZ), a una tasa de datos de 10Gbps y la tecnología DP-QPSK a 40Gbps está ya disponible por los fabricantes y los operadores están cerca de su despliegue. Está previsto que las tecnologías de transmisión en los próximos años alcancen velocidades de 100Gbps en una sola longitud de onda de 50GHz dentro de la rejilla fija de la ITU-T, y ya existen estudios [18][23] donde se está investigando la transmisión de 400Gbps y hasta 1Tbps mediante técnicas de transmisión multiportadora. Aunque estas tecnologías aún no están en su estado de madurez es de esperar que lo lleguen a estar antes de finalizar esta década.

En base a lo anterior, se ha realizado una previsión de la fecha aproximada en que estará disponible cada una de las velocidades de transmisión descritas. A continuación, los datos de capacidad, formato de señal y año de disponibilidad (estimado) de la tecnología necesaria para su transmisión vienen recogidos en la Tabla 6-3:

Transmission technology	Number 12.5 GHz slots / Spectrum	Distance (Km)	Year Of Release
OOK-NRZ – 10 Gbps	2 / 25 GHz	2200	Commercial Available
DP-QPSK – 40 Gbps	2 / 25 GHz	2800	Commercial Available
DP-QPSK – 100 Gbps	3 / 37.5 GHz	2800	2015
OFDM - DP- QPSK - 400 Gbps	10 / 125 GHz	3560	2017
OFDM - DP- QPSK– 1 Tbps	24/300 GHz	3560	2019

**Tabla 6-3: Tipos de conexión y año de disponibilidad[63][64].**

Sin embargo no todas estas tecnologías de transmisión son soportadas por las redes WSON. Las transmisiones a largas distancias, con capacidad superior a 100Gbps no pueden ser transmitidas en una única lambda (50 GHz ITU-T Grid), como ya se explicó en la sección 2.1.

En las redes SSON, por el contrario, mediante las extensiones realizadas en el plano de control y técnicas de transmisión multiportadora como OFDM, permiten conexiones con ancho de banda flexible sobre una rejilla espectral más fina (12.5 GHz) y escalabilidad en la elección del número de subportadoras que conforman la señal. Por lo tanto, este modelo de red permite la posibilidad de combinar en la misma red canales de diferentes anchos de banda y alcanzar velocidades hasta 1Tbps y aún mayores.

## 6.2.2 Arquitectura de red

El estudio se centra en el cálculo del equipamiento necesario para la transmisión y enrutado del tráfico óptico. Es necesario por tanto definir una arquitectura de nodo para toda la red de cara a cuantificar los componentes (WSS y transpondedores principalmente).

Para este estudio se ha escogido la arquitectura de nodo presentada en [54] donde, cada nodo es un ROADM con capacidad tanto de conmutación, como de transmisión. Cada ROADM tendrá las funcionalidades *Colorless*, *Directionless* y *Contentionless* (en adelante CDC) explicadas en el apartado 2.1.4.2. La arquitectura de nodo será del tipo *Broadcast and Select*, el número de componentes por puerto, el número de puertos de cada WSS y la configuración del módulo Add/Drop de cada nodo viene recogida en el siguiente esquema.

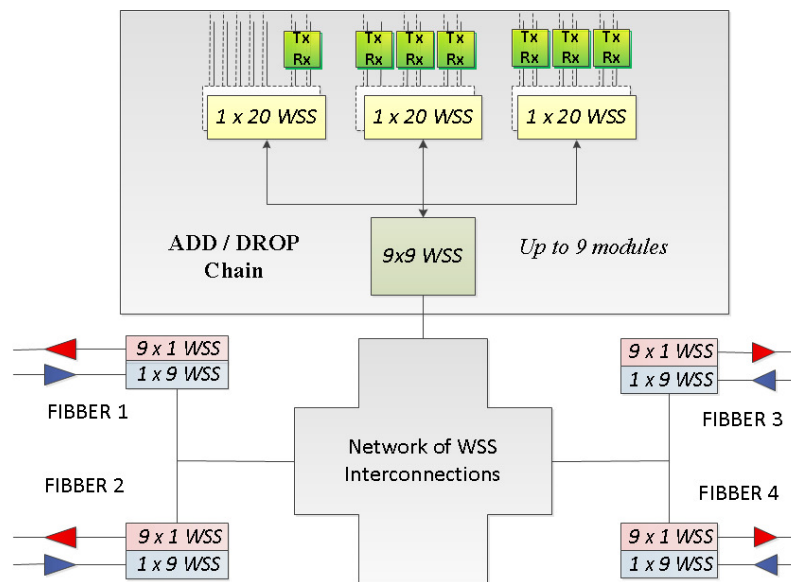


Figura 6-3: Arquitectura ROADM [54].

Esta arquitectura de nodo permite que las rutas puedan configurarse automáticamente entre dos nodos (dentro de un alcance máximo, a saber 800km para canales de 100Gbpsy más allá) sin regeneración. La funcionalidad *contentionless* permite que la misma longitud de onda pueda ser transmitida y recibida hacia/desde dos o más direcciones diferentes (enlaces entrantes al nodo) que, en términos de restricciones de planificación, implican que la única restricción es que dos canales diferentes no pueden compartir los mismos recursos espectrales en el mismo enlace.

Los componentes que forman cada ROADM son:

- 1x9 WSS, 1x20 WSS y 9x9WSS.

- Transpondedores (10G, 40G, 100G, 400G, 1T).

El grado del ROADM se calcula como el número total de fibras que entran/salen del nodo. Por cada grado, los componentes necesarios son los siguientes:

- 2 WSS 1x9.
- 1 Splitter / 1 Combinador.

Para cada módulo de Add/Drop se requieren dos WSS 1x20 y los correspondientes transpondedores/receptores. Y además, para toda la cadena Add/Drop que se necesita adicionalmente:

- 2 WSS 9x9

La adición de una nueva fibra entre una pareja de ROADMs, se produce cuando los recursos espectrales del enlace se agotan y es imposible encaminar un nuevo canal a través de él. En este caso, es necesario introducir una nueva fibra paralela en el enlace y también incrementar el grado ROADM fuente y destino.

En cuanto a la inversión en tecnología, la comparativa entre cada tres casos se referirán a:

- El número total de WSS necesarios cada modelo de red.
- El número y el tipo de transpondedores necesarios para transmitir y recibir las señales.

Es importante distinguir entre la WSON y los modelos de red SSON. Toda la descripción de la tecnología anterior es aplicable a todos los casos, las diferencias aparecen en el tipo WSS y los modelos de transpondedores. Como se ha dicho antes en el modelo WSON no es posible para manejar las demandas superiores a 100 Gbps, por lo tanto, no habrá tales transpondedores en este caso. En el modelo Flexgrid, los WSS requieren una nueva funcionalidad, la flexibilidad en el ancho del filtrado basándose en la nueva rejilla Flexgrid de 12.5 GHz que permitirá el filtrado de canales con anchos de banda diferentes.

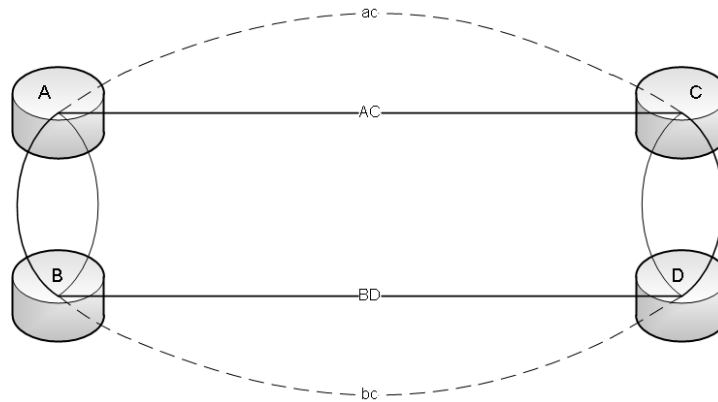
### 6.2.3 Modelos de tráfico

El estudio ha sido llevado a cabo bajo dos premisas distintas: en primer lugar un caso simple en el que no hay protección del tráfico en ningún caso. Y en segundo lugar se aplica un modelo de protección del tráfico tanto a nivel de nodo como a nivel de enlace.

El modelo de protección es el siguiente:

1. El tráfico es protegido a nivel IP duplicando el tráfico, de una demanda desde un origen a un destino, a otro par de nodos paralelos ubicados en la misma ubicación geográfica. Esta protección es a nivel de nodo y ambas rutas son completamente disjuntas, es decir, no comparten ningún enlace ni ningún nodo. Esta protección es del 100% del tráfico.

2. En segundo lugar se efectúa una segunda protección a nivel óptico del 50%. En este caso, la protección es únicamente a nivel de enlace es decir se planifica una segunda ruta disjunta desde el nodo origen al destino, de las dos rutas creadas inicialmente.



**Figura 6-4: Modelo de protección del tráfico.**

En ambos casos se ha aplicado la misma matriz de tráfico, por lo tanto, inicialmente existe la misma demanda en ambos modelos. En primer lugar es importante diferenciar el tráfico demandado, del tráfico real que lleva la conexión. La demanda es el tráfico solicitado por la capa de red inferior, y la conexión es el tráfico real que se reserva en la red, que incluye la demanda y el tráfico de protección. Sin embargo, la demanda puede ser considerada de diferentes maneras, dependiendo del modelo:

1. En el modelo simple, la demanda total entre los nodos es la suma del tráfico demandado por la capa inferior entre cada par de nodos dentro de la matriz.
2. En el modelo protegido, la demanda representa lo mismo, sin embargo en este caso las demandas dentro de la matriz de tráfico están emparejadas, una demanda representa el canal principal y el segundo el canal de protección a nivel de nodo. En este caso los canales de protección no se tienen en cuenta con el fin de representar la demanda real. Estas conexiones de protección a nivel de nodo, así como las conexiones de protección a nivel de enlace son tratadas como peticiones de conexión en el estudio, pero no representan la demanda real de tráfico solicitados por las capas inferiores.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la demanda final total en ambos modelos se ha medido; también, el tráfico total enrutado (conexiones). En el primer modelo, aparecen pequeñas diferencias entre la demanda total, y el tráfico total de las conexiones. Esto es debido a que la capacidad de los canales disponibles (10, 40, 100Gbps, etc.) son cifras enteras, y por tanto, la suma total de los canales asignados a aprovisionar una conexión siempre excederá un pequeño porcentaje de la demanda real.

Sin embargo, las diferencias en el modelo de protección, representan el tráfico adicional generado por las conexiones de protección. El valor total del tráfico total procesado por la red debería aproximarse al tráfico teórico adicional propuesto por el modelo (200% adicional a la demanda total).

<i>Caso de estudio / Modelo de trafico</i>		<i>Número Total de Conexiones</i>	<i>Demanda Total (Gbps)</i>	<i>Tráfico Total procesado (Gbps)</i>		
				<i>Trafico protección a nivel de enlace (Gbps)</i>	<i>Trafico de conexiones principales (Gbps)</i>	<i>Trafico protección a nivel de nodo (Gbps)</i>
<b>WSON</b>	<b>STM*</b>	4559	432.068	-	434.470	-
	<b>PTM**</b>	4559	246.352	241.150	675.620	186.910
	<b>6.2.4</b>				230.785	
<b>SSON</b>	<b>STM</b>	756	432.068	-	461.570	-
	<b>PTM</b>	755	246.352	230.785	692.355	200.010
	<b>6.2.5</b>				261.560	
<b>Caso mixto</b>	<b>STM</b>	1321	432.068	-	464.070	-
	<b>PTM</b>	1061	246.352	241.250	709.320	203.710
					264.360	

**Tabla 6-4: Resultados del tráfico procesado al final del estudio en el año 2034.**

\* STM: Single Traffic Model

\*\* PTM: Protection Traffic Model

La Tabla 6-4 recoge todo el tráfico procesado en las simulaciones. Los resultados muestran que la efectivamente al final del estudio la demanda es la misma para los tres casos de estudio y en ambos modelos de tráfico. También se puede observar, el mismo número de conexiones en los dos primeros casos. En el caso mixto, el número de conexiones es distinto debido a que en el modelo de protección el tráfico generado es mayor y la red se satura antes, dando paso a la migración hacia Flexgrid anteriormente al caso sin protección. Esto provoca que sea posible establecer canales de mayor capacidad antes, y por tanto provoca una reducción en el número de canales establecidos de 100G y por lo tanto una reducción en el número de conexiones totales. En los resultados finales de estudio se apreciara más claramente este fenómeno y se analizara en profundidad sus consecuencias.

Por último, los resultados en términos de tráfico total procesado en el marco del modelo de tráfico protegido ha sido dividida en tres subsecciones: tráfico de conexiones principales,

tráfico total de protección a nivel de enlace y tráfico total de protección a nivel de nodo. Se puede observar que cada uno de ellos representa aproximadamente un tercio del tráfico total, la razón por la cual el tráfico de protección nodo en todos los casos es inferior al tráfico principal, es debido a que la matriz de tráfico contiene un nodo-desprotegido demanda que causa la desigualdad entre tráfico principal y de protección.

## 6.2.4 Estrategias de migración

La estrategia de migración ha sido plasmada en el siguiente algoritmo:

1. *Cuando la primera conexión es rechazada porque la red está saturada, los enlaces de la ruta entre el par de nodos origen-destino de la correspondiente demanda, se duplican. Estos nuevos enlaces incorporaran la capacidad de conmutación de espectro flexible y serán añadidos en la nueva red SSON.*
2. *Cuando una conexión es rechazada dentro de la red SSON, se intenta enrutar dicha conexión en la antigua WSON. El proceso sigue los siguientes pasos:*
  - 2.1. *En primer lugar el total BW de la conexión se divide en un número de conexiones DWDM con el ancho de banda máximo que es capaz de ser transportado en una sola longitud de onda.*
  - 2.2. *Las demandas son servidas una a una por la red WSON y si una de ellas se es rechazada:*
    - 2.2.1. *El BW total enrutado en la WSON se resta del total solicitado al principio, una nueva solicitud SSON es creada, tanto la demanda principal como la de protección, con la capacidad disponible superior a la demanda restante. El BW extra-servido se tendrá en cuenta en la generación de la próxima petición a fin de evitar introducir tráfico extra innecesario.*
    - 2.2.2. *Si la conexión ha sido completamente servida por la red WSON la demanda se elimina de la tabla de solicitudes y una nueva demanda se toma para continuar con la simulación.*
3. *Si la demanda no ha sido servida aún, una nueva solicitud SSON es creada, pero antes de enviarla al algoritmo, la función de generación de enlaces es llamada (es importante recordar que la solicitud había sido denegada inicialmente desde la red SSON) para calcular los enlaces que se deben crear para permitir que esta nueva solicitud pueda ser servida.*
4. *Cuando una conexión es rechazada por el algoritmo SSON y se llama a la función de generar nuevos enlaces, la estrategia para elegir qué enlaces se deben crear es la siguiente:*
  - 4.1. *Se calcula el camino más corto entre el origen y el destino de la petición.*
  - 4.2. *Se comprueba que existan los enlaces dentro de la red SSON. Si uno o más de ellos*

La principal problemática en el caso mixto es descubrir la manera de llevar a cabo la migración entre tecnologías de la manera más óptima, la gestión más inteligente de



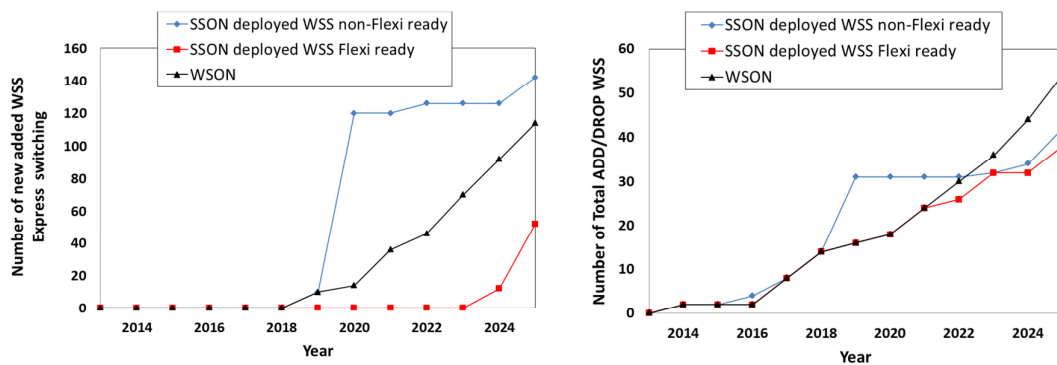
despliegue de nuevos equipos, con el fin de ahorrar costes y maximizar el uso de la tecnología heredada.

## 6.2.5 Resultados de la simulación.

Las simulaciones tienen el objeto de cuantificar y comparar el incremento en los grados de los ROADMs en los tres escenarios y la evolución en el número de conexiones (BVT) que se traduce en el número de transpondedores necesarios para la transmisión.

En primer lugar se presenta la comparativa entre el número de WSS necesarios a desplegar a lo largo de los años en los tres casos de estudio. El caso mixto y el caso SSON puro, en esencia se diferencian en la posibilidad de activar mediante software o no, la funcionalidad *gridless* de los WSS. En caso de no poderse activar dicha funcionalidad, los WSS deben ser reemplazados. En este caso como ya hemos detallado en profundidad, se ha optado por una estrategia mixta que mantenga el equipamiento no elástico de la red hasta su total explotación e inicie un paulatino despliegue de nuevo equipamiento flexible al agotar los recursos iniciales.

Los resultados mostrados a continuación (Figura 6-5) corresponden al modelo con protección comentado anteriormente.

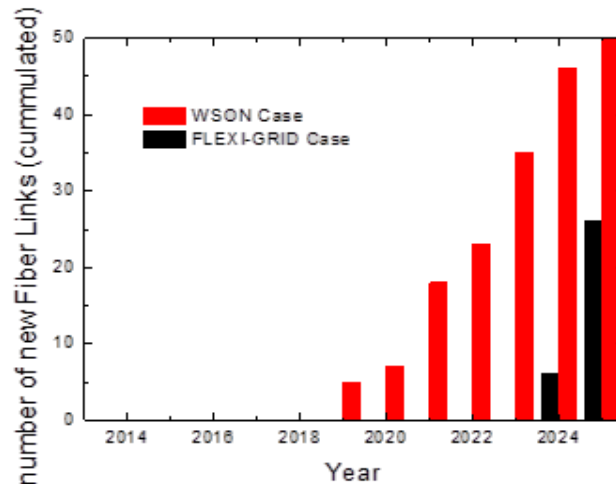


**Figura 6-5:a) Número de 1x9 WSS para el módulo de conmutación (*Express-switch*), b) número de 1x20 WSS en el módulo Add/Drop.**

Una de las primeras conclusiones que se pueden sacar de este estudio es en qué año los recursos de la red WSON estarán agotados. En el momento en que se introduce una nueva fibra debe introducirse un nuevo módulo de conmutación (2 - 1x9 WSS) en los nodos que se conectan mediante dicha nueva fibra. Por tanto, fijándonos en la gráfica a), el año en que se introduce el primer WSS en caso WSON es 2019.

Ahora comparándolo con el caso Flexible desde el inicio (SSON Flexi-ready) se observa como la vida de la red aumenta en 5 años (2019 - 2024). Esta conclusión se puede obtener más claramente de la gráfica de la Figura 6-6, que muestra una comparativa entre el

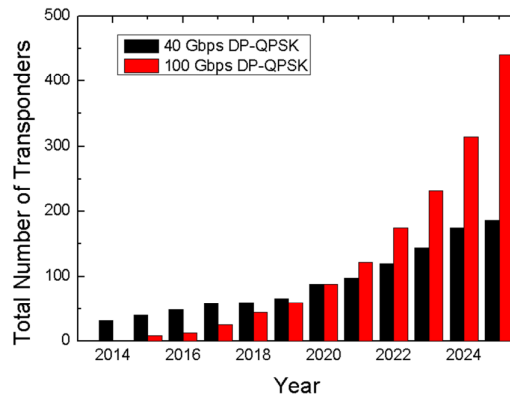
número de nuevas fibras que deben ser introducidas al agotarse la capacidad de los enlaces ya establecidos, entre el caso WSON y SSON Flexi-ready.



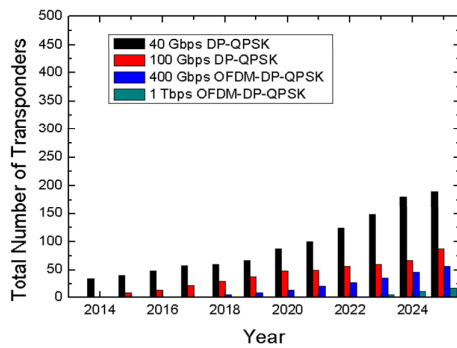
**Figura 6-6: Numero de nuevas fibras desplegadas cada año del estudio.**

Por tanto, ya se ha obtenido un beneficio tangible a la hora de implementar una red flexible en el caso de tener equipamiento inicial que lo permita.

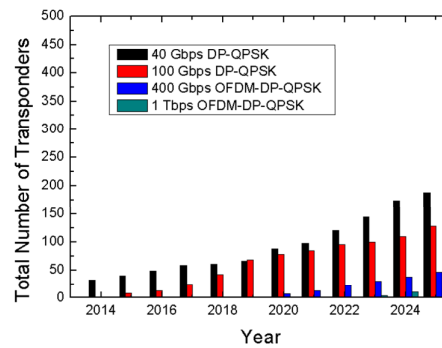
En el caso de que el operador no disponga de WSSs con la funcionalidad *gridless*, el gasto inicial en el punto de agotamiento de la red WSON (2019) es muy grande, dado que hay que introducir una nueva red paralela prácticamente. Sin embargo se observa cómo mientras la introducción de nuevo equipamiento en el caso puro WSON crece exponencialmente a partir de 2019, en el caso mixto después la introducción inicial, el equipamiento no crece demasiado igualando al caso WSON en el número de WSS Add/Drop en 2022. Sin embargo es difícil prever más allá de 10-15 años vista la evolución de la red ya que puede sufrir cambios drásticos en ese tiempo. En segundo lugar, se ha comparado el despliegue de transpondedores en los tres casos.



a) Modelo evolutivo de red WSON.



b) Modelo evolutivo de red SSON



c) Caso mixto de evolución de la red inicial WSON hacia SSON.

**Figura 6-7: Número total de transpondedores divididos por tipo, para cada caso de estudio.**

Los resultados (Figura 6-7) muestran un gran incremento en las conexiones de 100Gbps del caso WSON con respecto a los casos que incluyen rejilla flexible, ya que en estos casos, la introducción de canales de mayor capacidad (400Gbps, 1Tbps) reduce el número total de transpondedores. No obstante, sin tener datos económicos que cuantifiquen el coste de los distintos transpondedores no se puede saber si esta reducción de equipamiento, en caso flexible, supondrá un ahorro económico importante en el coste total de la red o si, al tratarse de equipamiento más moderno y complejo los costes de transmisión se mantendrán similares en ambos casos.

### 6.3 Comparación de eficiencia de algoritmos

Por último se va a concluir el apartado de resultados con una comparativa de la eficiencia en la asignación de recursos de los diferentes algoritmos descritos en la sección 4.

### 6.3.1 Marco del estudio

En este estudio se van a comparar: por un lado un algoritmo RWA (AURE) enmarcado en un plano de control con rejilla fija DWDM; dos algoritmos RSA básicos (AURE-SSON y KSP-CB); y por último un algoritmo RSA adaptativo a la distancia (KSP-DA-MSA).

El escenario del estudio es el mismo que el expuesto en la sección 6.2. Únicamente se contemplarán los casos WSON y SSON puros, sin tener en cuenta el caso mixto en esta comparativa (ya que el análisis de despliegue de equipamiento se realizó en la sección anterior).

El procedimiento es análogo, las simulaciones se realizan en una herramienta de planificación desarrollada por el autor (descrita en el apéndice A de este documento), y se utilizan los siguientes formatos de señal para transmitir en cada caso.

Algoritmo	Tecnología de Transmisión	Eficiencia Espectral (bits/símbolo)	Eficiencia Espectral Efectiva (Gbps/GHz)	Distancia(Km)
<b>AURE-WSON</b>	DP-QPSK	4	40Gbps/50GHz = 0.8	2800
			100Gbps/50GHz = 2	
<b>AURE-SSON</b>	DP-QPSK	4	40Gbps/25GHz = 1.6	2800
			100Gbps/37.5GHz = 2.66	
<b>KSP-CB</b>	OFDM - DP-QPSK*	4	400Gbps/125GHz = 3.2	3560
			1000Gbps/300GHz = 3.33	
<b>KSP-DA-MSA</b>	DP-QPSK	4	40Gbps/25GHz = 1.6	2800
			100Gbps/37.5GHz = 2.66	
	DP-16-QAM	8	40Gbps/25GHz = 1.6	750
			100Gbps/25GHz = 4	
	OFDM-DP-QPSK*	4	400Gbps/125GHz = 3.2	3560
			1000Gbps/300GHz = 3.33	
	OFDM-DP-16-QAM*	8	400Gbps/75GHz = 5.33	750
			1000Gbps/150GHz = 6.66	

**Tabla 6-5: Formatos de transmisión disponibles para cada algoritmo[63][64].**

\* Transmisión a más de 100Gbps

Como ya se expuso en el apartado 4.3, el algoritmo KSP-DA-MSA, es capaz de cambiar el formato de modulación de la señal para adaptarse a la longitud de la ruta elegida para enrutar el canal. En este estudio, hemos elegido por simplicidad, únicamente dos formatos posibles (DP-QPSK y DP-16-QAM).

### 6.3.2 Resultados

El estudio parte de una red parcialmente ocupada con conexiones de 10Gbps heredadas del dimensionamiento para el año 2012 con los datos de la matriz de tráfico de la red de Telefónica España para el año 2012. Por motivos de confidencialidad no pueden ser expuestos en este PFC. La simulación se ha realizado hasta el año 2027 con un crecimiento de tráfico del 30% anual. Las capacidades de los canales de datos irán aumentando en función de la disponibilidad de la tecnología. La Tabla 6-3 recoge los años estimados en que las distintas capacidades de transmisión estarán disponibles para su despliegue. Por último, aclarar que la demanda será servida introduciendo el canal con capacidad superior, que más se ajuste a ella, es decir, si la demanda anual excede de la capacidad actual 30 Gbps se le asignará un canal con capacidad de 40Gbps, si excede 50Gbps un canal de 100Gbps.

Las métricas utilizadas han sido: la eficiencia espectral de red, la ocupación de la red en porcentaje sobre el espectro total y el espectro ocupado en THz. La eficiencia espectral de red se define como la capacidad total servida (Gbps) dividida por el espectro total ocupado (GHz).

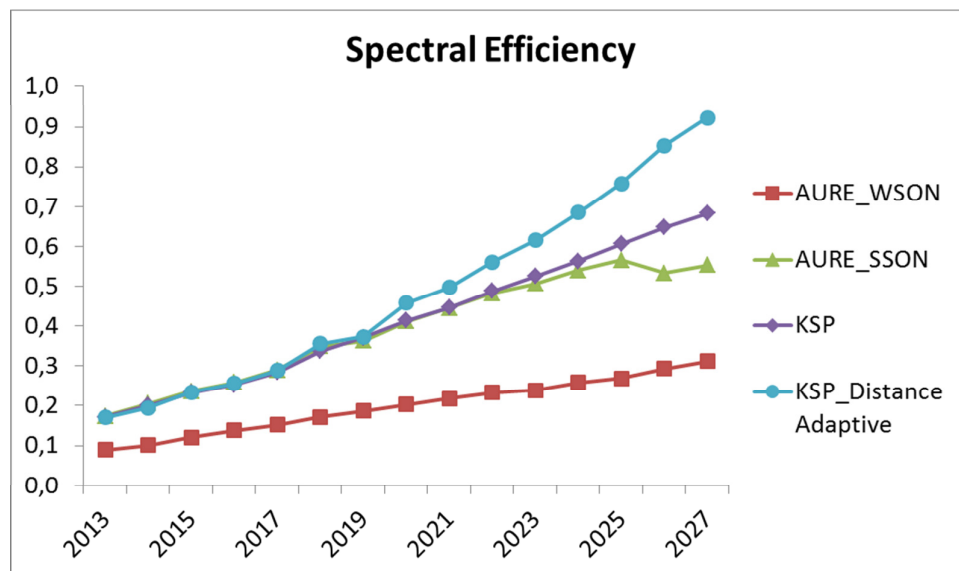
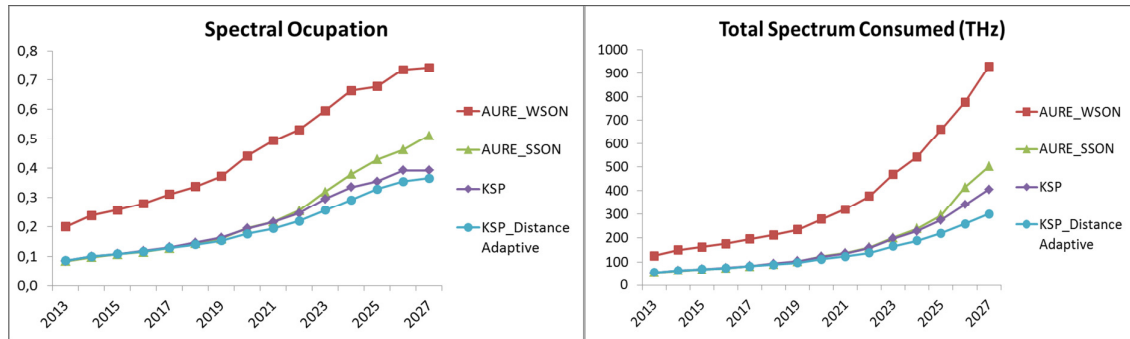


Figura 6-8: Eficiencia espectral de red (Gbps/GHz),



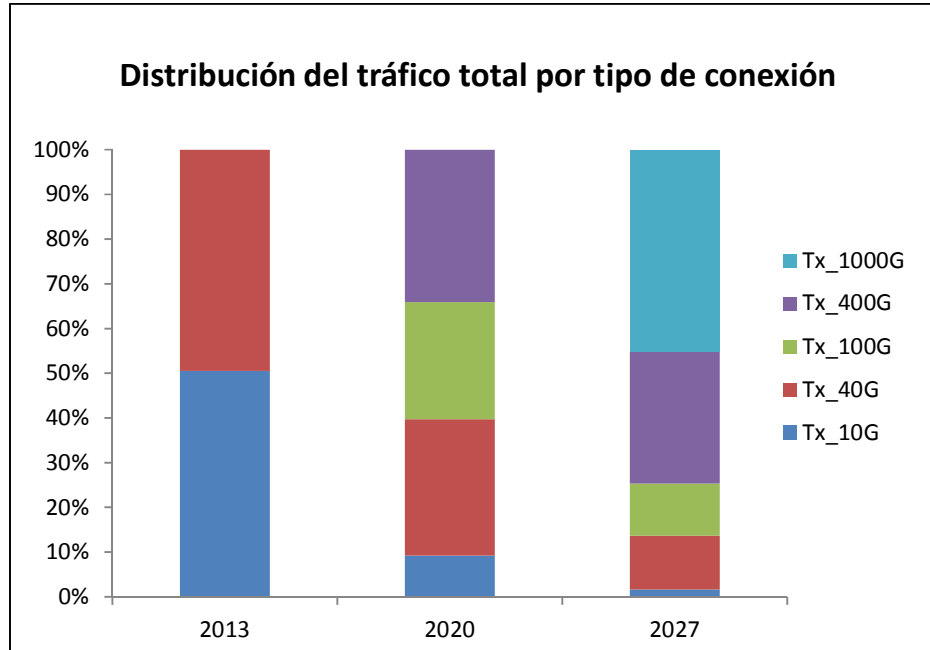
**Figura 6-9: a) Ocupación espectral, b)Espectro total consumido (THz).**

En la Figura 6-8 y Figura 6-9 a), se puede observar como existe una relación inversa entre la eficiencia espectral y la ocupación. Cuanto mayor es la eficiencia espectral, la ocupación del espectro es menor para el mismo tráfico. El caso algoritmo AURE-WSO ofrece los rendimientos más pobres, mientras que el algoritmo adaptativo a la distancia KSP-DA-MSA obtiene los mejores.

Es reseñable que los algoritmos basados en *KSP*, son más eficientes que AURE. AURE es un algoritmo exhaustivo que encuentra una ruta siempre que haya recursos en la red. Conforme aumenta la ocupación las rutas encontradas cada vez se alejan más de la solución óptima (*Shortest Path*). Esto hace que al aumentar el número de enlaces que atraviesan, el consumo total de espectro por ruta es mayor, y por tan la eficiencia global de red disminuye.

En el caso de los algoritmos que basan el enrutado en el algoritmo KSP ( $K=3$  en todos los casos), siempre se tomarán las 3 rutas más cortas como posibles soluciones. En caso de no encontrar ningún camino posible, se procederá a la inserción de nuevo equipamiento óptico (Fibras, WSS...) que aumenten la capacidad de la red. Esto hace que, la eficiencia espectral de la red sólo dependa de la eficiencia espectral de los canales introducidos, y no de la longitud de las rutas como en el caso de AURE.

Por último se puede observar como el rendimiento de la red aumenta conforme pasan los años. Esto se explica por la introducción de canales de mayor capacidad conforme pasan los años. Las conexiones de mayor capacidad tienen una mayor eficiencia espectral que los canales con capacidad más baja según se recoge en la Tabla 6-5.



**Figura 6-10: Distribución del tráfico por tipo de conexión para los años: 2013, 2020 y 2027. Distribución para el algoritmo AURE-SSON.**

Para ilustrar este fenómeno, en la Figura 6-10 muestra el porcentaje de capacidad servida por cada tipo de conexión (10, 40, 100, 400, 1000Gbps), en tres años del estudio (2013, 2020 y 2027). Los resultados muestran como progresivamente, el porcentaje de la capacidad total servida por conexiones de mayor capacidad (100, 400, 1000Gbps) va aumentando, y por conexiones de menor capacidad (10, 40Gbps) disminuyendo. Es por ello que la eficiencia espectral aumenta con el tiempo, ya que los canales con alta capacidad tienen una eficiencia espectral mayor. Por simplicidad se incluye únicamente un ejemplo (el del caso AURE-SSON) para ilustrar este fenómeno.

Numéricamente se obtiene que la diferencia, en ocupación bruta de la red al final del estudio, entre los casos mejor y peor (KSP-DA-MSA y AURE-WSN), sea de 629,25THz, lo que representa aproximadamente la necesidad de incluir 158 (4THz por fibra) fibras más en el caso WSON implementando una red elástica.





## 7 Conclusiones y trabajo futuro

---

### 7.1 Conclusiones

La motivación que induce el desarrollo de las redes elásticas es la de aprovechar más eficientemente los recursos de la red óptica, en pos de poder aumentar la capacidad de la misma. Asimismo la necesidad de transmitir canales con capacidad mayor de 100Gbps es una realidad que obliga a los operadores a buscar soluciones a dicha limitación impuesta por la rejilla de tamaño fijo inherente de las transmisiones WDM.

El desarrollo de nuevos formatos de modulación multiportadora, tales como O-OFDM o N-WDM, la madurez de sistemas de recepción coherente y la evolución de los equipos tanto de transmisión (BVT y S-BVT), como de conmutación (BV-WSS y ROADM), han establecido un marco general en el que el concepto de una red elástica, dinámica y más eficiente es posible.

Los resultados aportados por este proyecto concluyen que la capacidad de la red mediante la introducción, únicamente, de un plano de control *Flexgrid* podría incluso doblar la capacidad de la red, en algunos casos, mediante la introducción de formatos de transmisión espectralmente más eficientes y permitiendo la asignación de canales de ancho de banda variable.

La introducción de canales de datos de 400Gbps económicamente viables podría ser una razón importante para el despliegue de EONs a corto plazo (3-5 años). Se ha remarcado numerosas veces durante este proyecto como, mediante formatos de modulación más eficientes (DP-QPSK, 16-QAM) el ahorro en el espectro consumido puede derivar, en un futuro, en grandes ahorros tanto de espectro como de equipamiento óptico.

Sin embargo, la capacidad de los recursos de la red troncal de Telefónica España no está previsto que se agote hasta 2019 tal y como se expone en la publicación relacionada “*Migration Steps Towards Flex-grid Networks*”, adjunta a este proyecto en el Anexo A.B. Este hecho condiciona la apuesta por una red flexible a corto plazo, debido principalmente a que actualmente el equipamiento óptico necesario para su despliegue es altamente costoso e incompatible con el desplegado actualmente.

Además, este proyecto ha desarrollado extensiones del plano de control para redes elásticas. Este trabajo ha permitido la validación e implementación de los algoritmos en un entorno realista, lo que permite afirmar que actualmente ya existe un plano de control capaz de conmutar trozos de espectro de ancho de banda variable y realizar las mismas funcionalidades que en el caso de rejilla fija WDM. Este plano de control se ha puesto a prueba en el trabajo “*Experimental Demonstration of H-PCE with BPG-LS in elastic optical networks*” que ha dado lugar a una publicación en un congreso de ámbito internacional. Este trabajo aparece en el Anexo A.B.

## **7.2 Trabajo futuro**

Fuera del ámbito de este proyecto ha quedado establecer comparativas de rendimiento al introducir algoritmos de-fragmentación del espectro que pudieran arrojar mejores resultados aún sobre el aprovechamiento de recursos en las redes elásticas.

Una de las mayores preocupaciones desde el punto de vista del operador, es la justificación económica para el despliegue de cualquier tecnología. En el ámbito de las EONs, uno de los factores fundamentales en dicha justificación es la implementación de una arquitectura de red que permita un ahorro en el equipamiento óptico necesario para su despliegue. A este efecto la arquitectura de un transpondedor *multi-flow* como el descrito en el apartado 2.1.3.3 puede ser una de las piezas clave que permita desarrollar esta justificación.

Sin embargo donde, bajo mi punto de vista, debería ir a parar la mayor parte del esfuerzo de los investigadores en este ámbito, es en establecer un marco de dinámico en la asignación de canales sobre las redes ópticas. Las redes elásticas no solo permiten establecer canales de anchos de banda variables, sino explotar la variabilidad del tráfico en la red en vías de un aprovechamiento mayor de los recursos de la red. La asignación de canales estáticos temporalmente, en la red supone un desperdicio considerable de recursos en periodos de baja actividad.



## Referencias

---

- [1] M. Jinno et al., "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: Architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE Comm. Mag.*, vol. 47, pp. 66-73, 2009.
- [2] ZHANG et al.: "A Survey on OFDM-Based elastic core optical networking", *IEEE Communications, Surveys & Tutorials*, August 2012.
- [3] Alberto Castro, Luis Velasco, Marc Ruiz, Mirosław Klinkowski, Juan Pedro Fernández-Palacios, and Davide Careglio, "Dynamic Routing and Spectrum (Re)Allocation in Future Elastic Optical Network".
- [4] A. Farrel, J.P. Vasseur, J. Ash, "RFC – 4655 A Path Computation Element (PCE)-Based Architecture", August 2006. Online: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4655>
- [5] [RFC 5440] "Path Computation Element (PCE) Communication Protocol (PCEP)".
- [6] [RFC 3473] Berger, L., Ed., "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Signaling Resource Reservation Protocol- Traffic Engineering (RSVP-TE) Extensions", RFC3473, January 2003.
- [7] M.Jinno, A.Lord, S.J. Ben Joon, "Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?", *IEEE Communications Magazine* • February 2012 .
- [8] [Recommendation ITU-TG.694.1] "Spectral grids for WDM applications: DWDM Frequency grid" (02/2012).
- [9] [IETF Draft] "Requirements for GMPLS Control of Flexible Grids," Fatai Zhang, October 2011.
- [10] Wei Zheng, Yaohui Jin, Weiqiang Sun, Wei Guo, Weisheng Hu, "On the Spectrum-Efficiency of Bandwidth-Variable Optical OFDM Transport Networks", *OSA / OFC/NFOEC* 2010.
- [11] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. A. Varvarigos, "Dynamic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-based Networks" *OSA/OFC/NFOEC* 2011, paper OTuI5.
- [12] W. Shieh and I. Djordjevic, "OFDM for Optical Communications," Academic Press, Elsevier, 2010.
- [13] M. Klinkowski, M. Ruiz, L. Velasco, D. Careglio, V. López, and J. Comellas, "Elastic Spectrum Allocation for Time-Varying Traffic in FlexGrid Optical Networks". *OSA/OFC* 2012 paper JTh2A.39.
- [14] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM based optical networks," *IEEE J. Lightw. Technol.*, vol. 29, no. 9, pp. 1354–1366, 2011.

- [15] L.Velasco, M.Klinkowski, M.Ruiz, J.Comellas, "Modeling the routing and spectrum allocation problem for flexgrid optical networks", *Photon Networks Communications* DOI 10.1007/s11107-012-0378-7.
- [16] G. Bosco, A. Carena, V. Curri, P. Poggiolini, and F. Forghieri, "Performance limits of Nyquist-WDM and CO-OFDM in high-speed PM-QPSK systems," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 1129–1131, Aug. 2010.
- [17] S. Benedetto and E. Biglieri, *Principles of Digital Transmission: With Wireless Applications*. New York: Kluwer, 1999.
- [18] A. Carena, V. Curri, P. Poggiolini, G. Bosco, and F. Forghieri, "Maximum reach versus transmission capacity for Terabit superchannels based on 27.75 Gbaud PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 829–831, Jun. 1, 2010.
- [19] G. Bosco, V. Curri, A. Carena, P. Poggiolini, F. Forghieri, "On the Performance of Nyquist-WDM Terabit Superchannels Based on PM-BPSK, PM-QPSK, PM-8QAM or PM-16QAM Subcarriers", *IEEE J. Lightw Technol*, vol. 29, no. 1, january 1, 2011.
- [20] M. Jinno, B. Kozicki, H. Takara, A. Watanabe, Y. Sone, T. Tanaka, A. Hirano, "Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network", *IEEE Communications Magazine* • August 2010 0163-6804/10.
- [21] R.-J. Essiambre, G. Foschini, P. J. Winzer, and G. Kramer, "Capacity limits of fiber-optic communication systems," *OFC 2009*, San Diego, Mar. 22–26, 2009, Paper OThL1.
- [22] W. Shieh and C. Athaudage, "Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing," *Electronics Letters*, vol. 42, no. 10, pp. 587–589, May 2006.
- [23] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, T. Yoshimatsu, T. Kobayashi, Y. Miyamoto, K. Yonenaga, A. Takada, O. Ishida, and S. Matsuoka, "Demonstration of Novel Spectrum-Efficient Elastic Optical Path Network with Per-Channel Variable Capacity of 40 Gb/s to Over 400 Gb/s," *Proc.*, 40 ECOC 2008, Paper Th.3.F.6.
- [24] K. Yonenaga, F. Inuzuka, S. Yamamoto, H. Takara, B. Kozicki, T. Yoshimatsu, A. Takada, and M. Jinno, "Bit-Rate-Flexible All-Optical OFDM Transceiver Using Variable Multi-Carrier Source and DQPSK/DPSK Mixed Multiplexing," *Proc.*, *OFC/NFOEC 2009*, Paper OWM1.
- [25] S. Frisken, G. Baxter, D. Abakoumov, H. Zhou, I. Clarke, and S. Poole, "Flexible and Grid-less Wavelength Selective Switch using LCOS Technology," *Proc.*, *OFC/NFOEC 2011*, Paper OTuM3.
- [26] R. Ryf, Y. Su, L. Möller, S. Chandrasekhar, D. T. Neilson, and C. R. Giles, "Data rate and channel spacing flexible wavelength blocking filter", *Proc.*, *OFC/NFOEC 2004*, Paper PDP10.
- [27] P. Roorda, B. Collings, "Evolution to Colorless and Directionless ROADMs Architectures", *OFC/NFOEC 2008* Paper NWE2.

- [28] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. Varvarigos, "Spectrally/Bitrate Flexible Optical Network Planning," Proc., ECOC 2010, Paper We.8.D.3.
- [29] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, Y. Sone, B. Kozicki, A. Hirano, and M. Jinno, "Dynamic Routing and Frequency Slot Assignment for Elastic Optical Path Networks that Adopt Distance Adaptive Modulation," Proc., OFC/NFOEC 2011, Paper OTuI7.
- [30] B. Kozicki, H. Takara, Y. Sone, A. Watanabe, and M. Jinno, "Distance-Adaptive Spectrum Allocation in Elastic Optical Path Network (SLICE) with Bit per Symbol Adjustment," Proc., OFC/NFOEC 2010, Paper OMU3.
- [31] T. Takagi, H. Hasegawa, K. Sato, T. Tanaka, B. Kozicki, Y. Sone, and M. Jinno, "Algorithms for Maximizing Spectrum Efficiency in Elastic Optical Path Networks that Adopt Distance Adaptive Modulation," Proc., ECOC 2010, Paper. We.8.D.5
- [32] K.-P. Ho, Phase-Modulated Optical Communication Systems, Springer, 2005.
- [33] Adrian Farrel and Igor Bryskin, "GMPLS: Architecture and Applications", Morgan Kaufmann; 1 edition (December 20, 2005)
- [34] R. Braden, "Resource Reservation Protocol (RSVP)", September 1997. Online: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2205>
- [35] D. Awduche, L. Berger, D. Gan, T. Li, V. Srinivasan, G. Swallow, "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels", December 2001. Online: <http://tools.ietf.org/html/rfc3209>
- [36] K. Kompella, Y. Rekhter, "Routing Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)", October 2005. Online: <http://www.ietf.org/rfc/rfc4202>
- [37] K. Kompella, Y. Rekhter, "OSPF Extensions in Support of Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS)", October 2005. Online: <http://tools.ietf.org/html/rfc4203>
- [38] V. López, B. Huiszoon, J. Fernández-Palacios, O. González de Dios, J. Aracil, "Path Computation Element in Telecom Networks: Recent Developments and Standardization Activities". In ONDM 2010.
- [39] [IETF-Draft]. Fatai Zhang, O. Gonzalez de Dios, "RSVP-TE Signaling Extensions in support of Flexible Grid", April 2012. Online: <http://tools.ietf.org/html/draft-zhang-ccamp-flexible-grid-rsvp-te-ext-00>
- [40] T.Otani, D.Li, "Generalized Labels for Lambda-Switch-Capable (LSC)Label Switching Routers" IETF RFC6205, March 2011 Online: <http://tools.ietf.org/html/rfc6205>
- [41] L. Berger, I. Bryskin, A. Zinin, and R. Coltun, "The OSPF opaque LSA," IETF RFC 5250, pp. 1–17, July 2008. Online (Dec. 2009): <http://tools.ietf.org/html/rfc5250>
- [42] IETF PCE working group home page. Online (Dec. 2009): <http://www.ietf.org/html.charters/pce-charter.html>.

- [43] K. Christodoulopoulos, I. Tomkos, and E. A. Varvarigos, "Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM-Based Optical Networks," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, vol. 29, no. 9, pp. 1354-1366, May 2011.
- [44] X.Wan, L.Wang, N.Hua, H.Zhang, X.Zheng, "Dynamic Routing and Spectrum Assignment in Flexible Optical Path Networks". OFC/NFOEC 2011, Paper JWA55.
- [45] Y.Sone, A. Hirano, A. Kadohata, M. Jinno, O. Ishida, "Routing and Spectrum Assignment Algorithm Maximizes Spectrum Utilization in Optical Networks," ECOC 2011, Paper Mo.1.K.3
- [46] Y.Wang, J.Zhang, Y.Zhao, J.Wang, W.Gu, "Routing and Spectrum Assignment by Means of Ant Colony Optimization in Flexible Bandwidth Networks". OFC/NFOEC 2012, Paper Ntu2J.3
- [47] X.Yu, J.Zhang, T.Peng, Y.Bai, D.Wang, "Spectrum Compactness based Defragmentation in Flexible Bandwidth Optical Networks". OFC/NFOEC 2012 Paper J.TH.2A.35
- [48] G.Zhang, M.DeLeenheer, B. Mukherjee, "Optical Grooming in OFDM-Based Elastic Optical Networks", OFC/NFOEC 2012 Paper OTh1A.1
- [49] M.Nathansen, U.Häbel, C.Margaria, E.Sfeir, A. Iselt, M. Bauer, "Implementation of UNI in optical multi-layer networks", Siemens AG, Corporate Technology.
- [50] ITU, "Rec. G.8080/Y.1304: Architecture for the automatically switched optical network (ASON)," February 2005.
- [51] Devarajan A, Sandesha K, Gowrishankar R, Sai Kishore B, Prasanna G, Ron Johnson and Pavan Voruganti, "Colorless, Directionless and Contentionless multi-degree ROADM architecture for mesh optical networks" *Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, January - 2010 Second International Conference on.
- [52] [IETF-Draft]. Fatai Zhang, O. Gonzalez de Dios, "PCEP extensions for GMPLS draft-ietf-pce-gmpls-pcep-extensions-07" Expires: April 2013, Outline: <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-pce-gmpls-pcep-extensions-07>.
- [53] D. King , A. Farrel , "Generalized Labels for the Flexi-Grid in Lambda-Switch-Capable (LSC) Label Switching Routers" Expires: 22 April 2013 , Outline:<http://tools.ietf.org/html/draft-farrkingel-ccamp-Flexgrid-lambda-label-04>
- [54] STRONGEST, "D2.1 Efficient and optimized network architecture: Requirements and reference scenarios," available at <http://www.ict-strongest.eu>, 2011.
- [55] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive wavelength routing in all-optical networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 197-206, April 1998.
- [56] Jinno, M.; Takara, H.; Sone, Y.; Yonenaga, K.; Hirano, A., "Multiflow optical transponder for efficient multilayer optical networking," *Communications Magazine, IEEE* , vol.50, no.5, pp.56-65, May 2012

- [57] W.Shieh, C.Athaudage, "Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing" ELECTRONICS LETTERS, The Institution of Engineering and Technology 2006, 23 February 2006.
- [58] V.López, Ó.Gonzalez De Dios, Ori Gerstel, N.Amaya, G.Zervas, D.Simeonidou, J.P.Fernandez-Palacios, "Target cost for Sliceable Bandwidth Variable Transponders in a Real Core Network" Future Networks & Mobile Summit Lisbon , Portugal 2013.
- [59] M<sup>a</sup> Carmen España, "Comunicaciones Ópticas. Conceptos esenciales y resolución de ejercicios", Ediciones Diaz de Santos, Madrid. España, 2005,pp. 199-205
- [60] Taylor, Michael, "Coherent Detection Method Using DSP for Demodulation of Signal and Subsequent Equalization of Propagation Impairments", IEEE Photonics Technology letters, vol. 16, no. 2, February 2004
- [61] T.J. Xia et al., "Field Experiment with Mixed Line-Rate Transmission (112 Gb/s, 450 Gb/s and 1.15 Tb/s) over 3560 Km of Installed Fiber Using Filterless Coherent Receiver and EDFASs Only," in Proceedings of OFC/NFOFC, March 2011.
- [62] Masahito Tomizawa, "DSP aspects for deployment of 100G-DWDM systems in carrier networks" OFC/NFOEC Technical Digest © 2012 OSA.
- [63] P. Winzer, "Modulation and Multiplexing in optical communication systems," IEEE LEOS Newsletter, Feb 2009
- [64] T.J. Xia et al., "Field Experiment with Mixed Line-Rate Transmission (112 Gb/s, 450 Gb/s and 1.15 Tb/s) over 3560 Km of Installed Fiber Using Filterless Coherent Receiver and EDFASs Only," in Proceedings of OFC/NFOFC, March 2011.



## Glosario

---

API	Application Programming Interface
ASON	Automatically Switched Optical Network
BVT	Bandwidth Variable Transponder
BW	Bandwidth
CDC	Colorless, Directionless, Contentionless
CF	Central Frequency
CS	Channel Spacing
DP	Dual Polarization
DSP	Dijkstra Shortest Path
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
E2E	End-to-End
EON	Elastic Optical Network
EOP	Elastic Optical Path
ERO	Explicit Route Object
FA	Forwarding Adjacency
FEC	Forward Error Correction
FF	First Fit
FS	Frequency Slot
GMPLS	Generalized Multiprotocol Label Switching
ILP	Integer Linear Programming
IP	Internet Protocol
ISI	Inter Symbol Interference
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization Sector
KSP	K-Shortest-Path
L2SC	Layer Two Switch Capable
LCoS	Liquid Crystal on Silicon.
LER	Label Edge Router
LMP	Link Management Protocol
LSA	Link State Advertisement
LSC	Lambda Switch Capable
LSP	Label Switched Path
LSR	Label Switch Router
MEMS	Micro-Electro Mechanical Sensor
MF	Modulation Format
MPLS	Multiprotocol Label Switching
OOK	On Off Keying
OPEX	Operational Expenditure
OSNR	Optical to Signal Noise Ratio
OSPF	Open Shortest Path First
OTN	Optical Transport Network

OXC	Optical Cross Connect
PCC	Path Computation Client
PCE	Path Computation Element
PCEP	Path Computation Element Communication Protocol
PFC	Proyecto Fin de Carrera
PR	Pre-Reserva
PSC	Packet Switch Capable
PTM	Protection Traffic Model
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RFC	Request for Comments
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer
RP	Request Parameters
RSA	Routing and Spectrum Assignment
RSVP	Resource ReSerVation Protocol
RWA	Routing and Wavelength Assignment
SRLG	Shared Risk Limited Group
SSON	Spectrum Switched Optical Network
STM	Single Traffic Model
SW	Slot Width
TCP	Transmission Control Protocol
TDM	Time-Division Multiplexing
TE	Traffic Engineering
TED	Traffic Engineering Database
TID	Telefónica I+D
WDM	Wavelength-Division Multiplexing
WSO	Wavelength Switched Optical Networks
WSS	Wavelength Selected Switch

## Anexos

---

### ***A Manual de uso de la herramienta de planificación: “Network Planning Tool”.***

A continuación se va a detallar el modo de funcionamiento y la estructura interna de la herramienta de planificación desarrollada para obtener los resultados obtenidos en este proyecto.

Se trata de una herramienta desarrollada en Java SE 6 sobre la herramienta multiplataforma Eclipse JDK 1.6 (Java Development Kit). Eclipse nos permite tanto redactar código Java mediante un editor de texto con resaltado de sintaxis (muy útil a la hora de programar), compilarlo y exportarlo en varios formatos, entre los que destaco .jar, por ser el formato de compresión utilizado para ejecutar el código en entornos remotos como el descrito en el apartado 5.2.1. Además Eclipse permite la instalación de paquetes para el control de cambios SVN. Esta explicación intenta resumir las herramientas utilizadas para el desarrollo de la *Network Planning Tool* (a partir de aquí NPT).

La herramienta desarrollada consta de una serie de módulos fundamentales:

- **Network planning tool:** Es la clase principal de la herramienta de planificación. Esta clase se encarga de inicializar el resto de clases de la herramienta, de recibir la tabla de peticiones anuales y enviar las peticiones con el formato determinado a los algoritmos de enrutamiento. Cuando una petición no ha podido ser servida, llama a la clase *Network Upgrade Module* para que se encargue de calcular que nuevas fibras deben ser introducidas. Por último se encarga de enviar los datos de las conexiones establecidas al módulo *Anual Statistics* para obtener las estadísticas deseadas en cada estudio.

En este módulo se leen los archivos de configuración de la herramienta, la topología de red, la matriz de tráfico o la distribución de probabilidades de las distintas conexiones según el caso de estudio, y por último la información referente a las características físicas de la red y de los enlaces de la topología. A continuación se detallan todos estos archivos:

- *Config file.xml*: Este es el archivo de configuración de la herramienta. Contiene los siguientes campos:
  - “*AlgorithmRule*”: Algoritmo elegido para el cálculo de rutas a través de la red en el caso WSON.
  - “*SSONAlgorithmRule*”: Algoritmo elegido para el cálculo de rutas a través de la red en el caso SSON.
  - “*ClassOfStudy*”: Parámetro que diferencia entre una red WSON y una SSON.

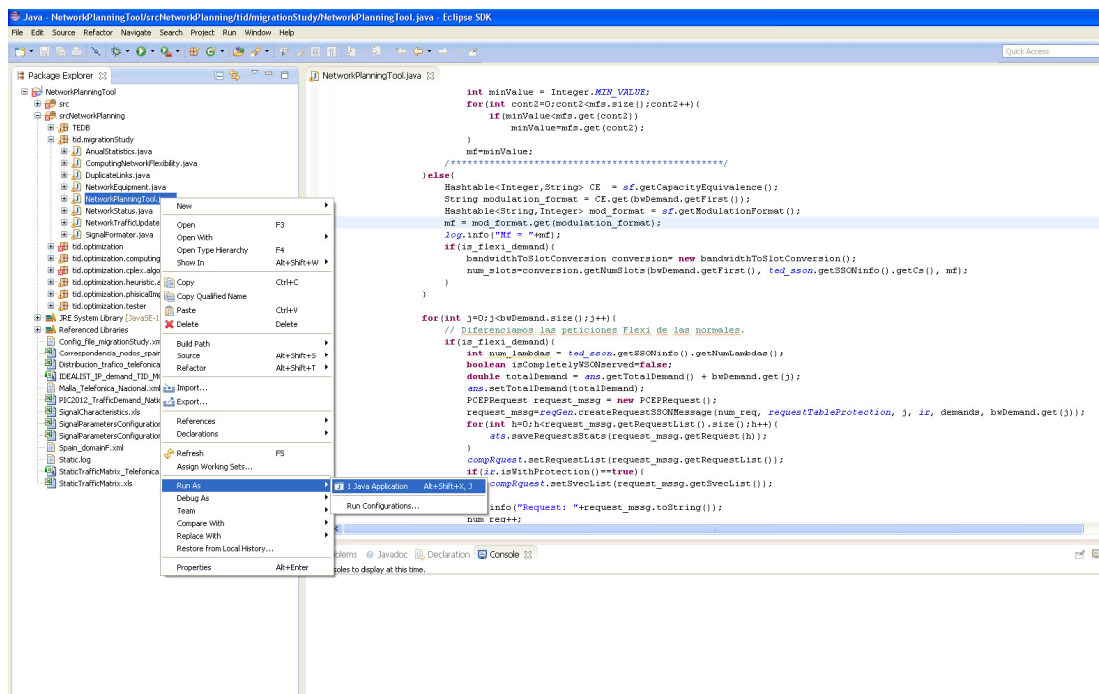
- “*WithProtection*”: Parámetro de tipo booleano que, en caso de tener el valor true, impone protección a nivel de nodo a las peticiones de la red. (Ver apartado 6.3.2 para la descripción de este tipo de protección).
  - “*WithOpticalProtection*”: Parámetro de tipo booleano que, en caso de tener el valor true, impone protección a nivel de enlace a las peticiones de la red. (Ver apartado 6.3.2 para la descripción de este tipo de protección).
  - “*TopologyFile*”: Este parámetro define el archivo que se utilizará como topología de red en las simulaciones.
  - “*TopologyInformation*”: Especifica el archivo que recoge la información de los parámetros físicos de los enlaces de la topología. Especifica la longitud de los mismos, el número de etapas de amplificación etc.
  - “*TrafficDistributionFile*”: Especifica el archivo que contiene la matriz de tráfico o la distribución de tráfico según el caso de estudio.
  - “*DemandProvisionStrategy*”: Este parámetro identifica la estrategia de asignación de conexiones a las demandas de tráfico. Se han definido dos estrategias:
    1. Maximum Capacity Available: Esta estrategia consiste en asignar la máxima capacidad transmisión disponible a la nueva demanda. El objetivo es proporcionar la capacidad solicitada para esta conexión específica y también proporcionar capacidad extra para el incremento de la demanda en los próximos años.
    2. Maximum Accurate Capacity to the current demand: Esta estrategia consiste en asignar un canal con la capacidad de transmisión más ajustada posible a la nueva demanda que se está sirviendo.
  - “*NumberOfYears*”: Número de años que se prolongará el estudio.
  - “*NumRequests*”: Número máximo de peticiones que se aceptarán.
  - “*Bidirectional*”: Establece que todas las conexiones sean bidireccionales.
  - “*IsDistanceDependent*”: Parámetro booleano que sirve para declarar que la elección del tipo de señal a transmitir es dependiente de la distancia y las características físicas de la ruta elegida.
- *TopologyFile.xml*: Es el archivo que recoge la información de la topología de red. Define los nodos y los enlaces que definen la red sobre la que se realizará el estudio, y define también las características del plano de control, tales como el número de longitudes de onda/slots para las redes WSON/SSON respectivamente, el espaciado entre canales, y el tipo de *grid* que se aplica al espectro óptico de cada enlace. El formato de este archivo es .xml.
- *TrafficDistributionFile.csv*: Este archivo define la matriz de tráfico que define las demandas que se introducirán en el estudio. Las demandas de tráfico vienen definidas por un par de nodos origen y destino, el ancho de banda a servir en Gbps y, en el caso de protección, un parámetro que asocia pares de nodos para la transmisión protegida a nivel IP. El tipo de archivo es .csv aunque la herramienta también acepta formato Excel .xls
- *SignalParametersConfiguration.xls*: Es el archivo de configuración para los distintos formatos de transmisión disponibles en el estudio. Este archivo recopila los siguientes parámetros físicos de transmisión: “*Formato de modulación*”, “*Capacidad (Gbps)*”, “*Año de disponibilidad*”, “*Código*”, “*Eficiencia Espectral*”, “*Distancia Max.*”, “*FEC*” y “*Banda de guarda*”.

- **Network status:** Este módulo es el encargado de guardar toda la información actualizada de la red. Cada vez que una petición de canal es procesada la respuesta devuelta por el algoritmo es procesada por esta clase, reservando los recursos espectrales de la petición y manteniendo en todo momento el estado de ocupación de la red. Esta clase también guarda información sobre las conexiones que han sido establecidas en la red.
- **Network traffic update:** Este módulo crea la matriz de tráfico a partir del archivo *TrafficDistributionFile.csv* siguiendo una de las estrategias descritas en el apartado “*DemandProvisionStrategy*”. Cada año actualiza el valor de las demandas dentro de la matriz de tráfico en función del crecimiento de tráfico estimado (para los estudios realizados ha sido siempre un 30%), y genera las nuevas conexiones necesarias para dar servicio la nueva demanda anual.
- **Network update module:** Se encarga de calcular y notificar al módulo *Network Status* y al pre-cómputo del algoritmo, las nuevas fibras introducidas en la red cuando una conexión falla. Para el cálculo de las nuevas fibras a introducir, este módulo incorpora una función encargada de calcular la ruta más corta entre el origen y el destino de la petición fallida y otra que comprueba el estado de ocupación espectral de los enlaces. La estrategia seguida consiste en ir paulatinamente duplicando aquellos enlaces que tienen la mayor ocupación y volver a llamar al algoritmo RSA/RWA correspondiente para verificar que la petición pueda ser servida. En caso negativo, seguirá duplicando enlaces hasta que la petición no sea rechazada.
- **Algoritmo RWA/RSA:** Los algoritmos utilizados para los estudios realizados son los descritos en la sección 4 de este documento.
- **Signal formater:** Este módulo se encarga de crear una estructura que recoja los distintos formatos de transmisión disponibles. Cuando el modulo *Network Update Module* crea la tabla de peticiones, ésta consulta al módulo *Signal Formater* para comprobar que capacidades de transmisión hay disponibles, información que se usa para asignar la capacidad a las conexiones necesarias para transportar las demandas.  
Además, en el caso de una red elástica, esta clase es consultada para calcular el número de *frecuency slots* que ocupa cierta conexión con una cierta capacidad dentro de los formatos de modulación disponibles para transmitirla.
- **Network equipment:** Esta clase traslada la información de la topología y de las conexiones establecidas, a la infraestructura óptica real que sería necesaria en función del modelo de nodo elegido (en la sección 6.2.2). Esta clase sirve para mantener un conteo del equipamiento introducido año a año y así poder reflejarlo en el archivo final de estadísticas.

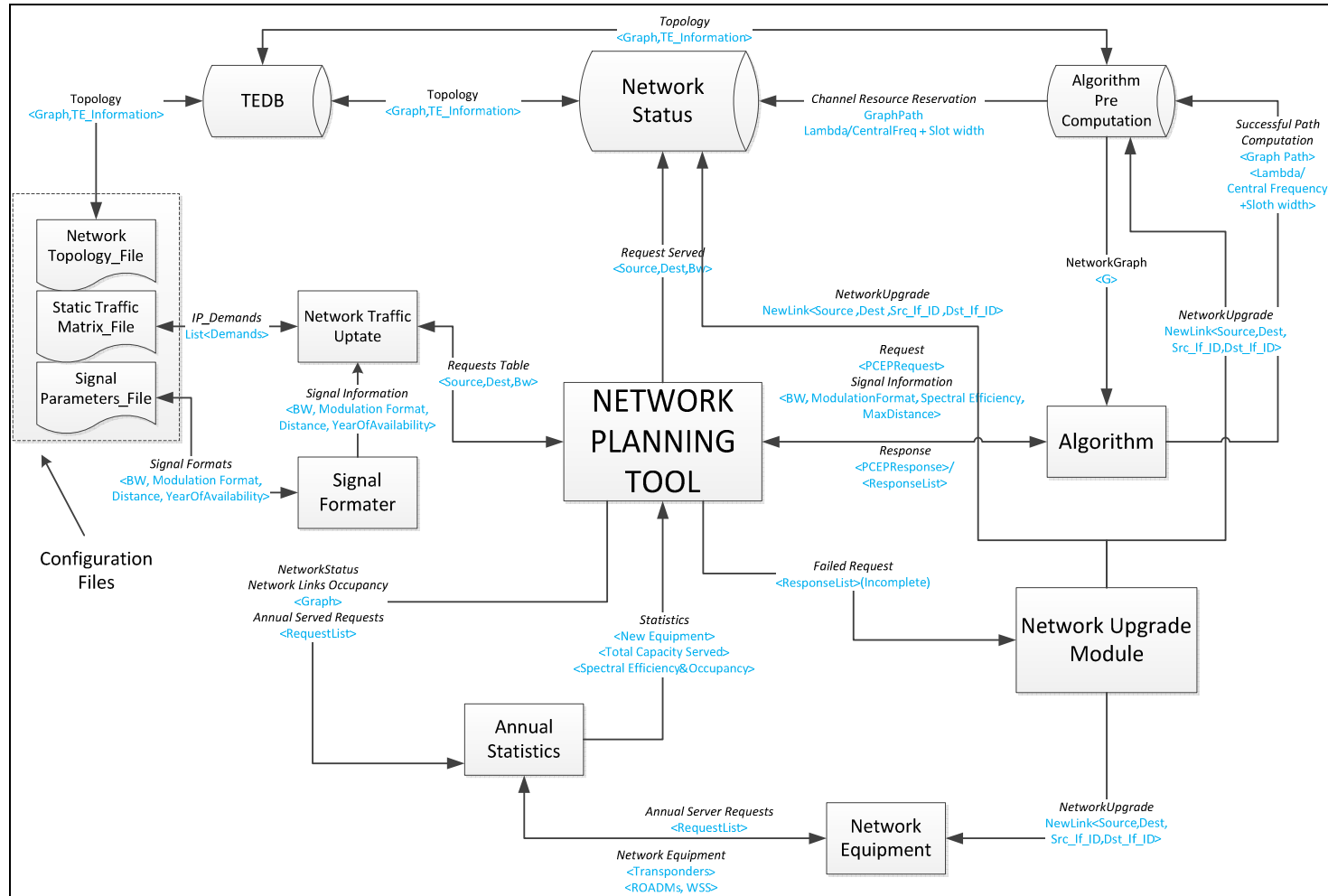
- **Anual Statistics:** Almacena las estadísticas totales y año a año de los siguientes parámetros: “Capacidad Total Servida”, “Capacidad Total Servida para protección”, “Demanda Total de Tráfico”, “Número Total de Peticiones”, “Numero de WSS flexibles”, “Numero de WSS”, “Numero de WSS Add/Drop”, “Numero de WSS Add/Drop flexibles”, “Numero de conexiones (por tipo)”, “Ocupación de red”, “Espectro Total Ocupado”, “Número total de regeneradores”.

El diagrama de bloques mostrado en el Anexo A-2 muestra la interconexión entre todos los bloques descritos, así como las variables que se intercambian entre sí.

El funcionamiento de la herramienta es automático, únicamente es necesario introducir los archivos de configuración en la carpeta del proyecto y ejecutar el comando “Run As: Java Application” sobre la clase principal de la herramienta (Network Planning Tool). Como ya se ha aclarado anteriormente el proyecto ha sido desarrollado en Eclipse y las ejecuciones se han llevado a cabo mediante la misma herramienta. A continuación se muestra una captura de pantalla de cómo ejecutar la herramienta en Eclipse.



**Anexo A-1: Captura ejecución Network Planning Tool en Eclipse**



Anexo A-2: Network planning tool. Diagrama de bloques.

## ***B Publicaciones relacionadas.***

La realización de este Proyecto Fin de Carrera ha dado lugar a las siguientes publicaciones:

- *Arturo Mayoral, Oscar Gonzalez de Dios, Victor Lopez, Juan Pedro Fernandez-Palacios, "Migration steps Towards Flexi-grid Networks", Future Networks & Mobile Summit 2013 Lisbon, Portugal.*

A continuación se adjunta la carta de aceptación de dicha publicación.

---

---

Thank you for submitting a full paper entitled "Migration Steps Towards Flexi-grid networks", paper reference number 99 for review by the Technical Programme Committee.

**The Final Verdict for your paper is Accept - requires minor revision**

The TPC has endeavored to provide every author with actionable feedback and guidance. You are now able to view your paper and Technical Programme Committee (TPC) assessments online via your My Page after logging into [www.FutureNetworkSummit.eu/2013](http://www.FutureNetworkSummit.eu/2013). The TPC assessment is an integrated page, providing each author with the evaluation criteria used, grades and comments provided by each IPC member and a final verdict.

If your paper has been provisionally accepted as either paper or poster, it is now necessary to make the modifications suggested to ensure a final paper for publication is ready for submission by 30 April.

Please complete registration online by 30 April.

Please note that each presenter will present one paper in the Programme. If you wish to move your paper to a replacement co-author who is not already in the Programme, please let us know prior to registration so the paper can be moved and Programme updated.

If your paper was not accepted for Future Network and MobileSummit 2013, we hope that you will find the comments received useful when next preparing a paper.

Thank you for submitting your paper under the Call for Papers for the Future Network and MobileSummit 2013.

Sincerely,  
Future Network and MobileSummit 2013 Organising Committee

Future Network and MobileSummit 2013  
03 - 05 July 2013, Lisbon, Portugal  
[www.FutureNetworkSummit.eu/2013](http://www.FutureNetworkSummit.eu/2013)





# Migration Steps Towards Flexi-grid Networks

Arturo Mayoral, Oscar Gonzalez de Dios, Victor Lopez, Juan Pedro Fernandez-Palacios  
*Telefonica I+D , Spain, Email: [ogondio@tid.es](mailto:ogondio@tid.es)*

**Abstract:** This paper first identifies a realistic expectation of modulation formats for the next 10 years and quantifies the possible capacity gains. It is studied when the capacity using fixed grid is exhausted and studies several evolution strategies towards flexi-grid. Results show the capacity will be exhausted by 2019 and by applying flexi-grid the network life can be extended five years. A shorter-term rationale to migrate to flexi-grid is the availability of cost-effective 400Gbps and 1Tbps transmission.

**Keywords:** flexi-grid, migration, core network.

## 1. Introduction

Telecommunication carriers are continuously exploring new solutions to upgrade their networks in order to handle the ever-increasing Internet traffic demand. Although CAPEX and OPEX reduction of new solutions is the most important driver for the adoption of a new technology, operators have to consider in this evaluation the migration process towards this new solution.

Existing DWDM optical communication systems divide the C-band optical spectrum into discrete bands, spaced usually by 50 or 100 GHz, which are normalized in the ITU G.694.1 Grid [1]. Conventional transponders provide individual wavelengths carrying a client demand (which might be Ethernet or OTN, and might have a payload of anything up to 100 Gbps), which can be accommodated, in just one of these discrete bands. However, Elastic Optical Networks (EON) [2] enable the optical spectrum to be used in a more flexible way, where chunks of spectrum can be defined more arbitrarily than currently. The ITU has extended [1] and [3] to include the concept of flexible grid. To do so, two modifications are done: a new set of nominal central frequencies and the concept of "frequency slot", which is the spectrum occupation of a signal.

Several research studies, trying to quantify the potential benefits of EON architectures have been recently performed [4], [5], [6]. One claimed advantage is that the spectrum ("frequency slot") assigned to a channel is adjusted to the real spectrum needs, so there is a less waste of spectrum. On the other hand, another advantage is the possibility to use advanced modulation schemes that have bigger spectrum needs than a typical 50 GHz (or even 100GHz) slot. Capital expenses, overall network capacity, blocking ratio and energy efficiency, between others, have been the subjects for comparison between the new EON approach and the traditional one. Although the above improvements are claimed in the literature, there is no work which analyses what are the real benefits for network operators and when EON technologies will be needed.

This paper first identifies a realistic expectation of modulation formats for the next 10 years from an operator point of view and quantifies the theoretical capacity gains. Moreover, the Telefonica Spain reference scenario is used to determine if the Routing and Spectrum Assignment (RSA) algorithm can achieve such theoretical gains and quantifies the maximum capacity of a deployed mesh. Then, three evolution strategies: (1) continuing with current fixed grid, (2) migrating to a flex-grid assuming that the already deployed

WSSs are flexi-ready (e.g. LCOS) and (3) a deployment of flexi-grid when capacity of existing network is exhausted and the deployed WSSs are not flexi-capable (e.g. MEMS). Finally, rationale to migrate to flexi-grid based on the demand of efficient 400 Gbps channels is presented.

## 2. Spectrum Efficiency improvements of Flexi-grid based optical network

One of the benefits of flexi-grid is the ability to adjust the spectrum reserved for a channel to the actual spectrum needs of the optical signal. Thus, the theoretical capacity increase of a flexi-grid network is obtained by comparing the spectrum used in flexi-grid (size of the best-fitted frequency slot) and the spectrum used in Wavelength Switched Optical Networks, WSON, (fixed to the channel spacing).

Following, a theoretical analysis comparing WSON and Spectrum Switched Optical Networks (SSON, used as an acronym of Flexi-grid network throughout the paper) is done considering optical channels between 10Gbps and 400Gbps. The signal characteristics of each type of connection (modulation format, spectrum efficiency in bits/symbol and guard band) are summarized in Table 1, obtained from data in several transmission studies [7], [2], [8]. For each channel type, the spectrum need is shown. 10 Gbps connections using NRZ-OOK require in Flexi-Grid a slot size of 25 GHz ( $m=2$ ), while 50 GHz (1 channel) is used in the fixed grid case. The rest of the connection types (40 Gbps, 100 Gbps and 400 Gbps) use DP-QPSK as a modulation format, achieving a spectral efficiency of 4bits/symbol. The spectrum needs shown in Table 1 consider a guard band of 7GHz between optical channels based on the WSS filtering analysis in [2] and assuming a longest path of 8 hops. The study takes into account the impact of the FEC by increasing the data rate by 12%, as proposed by Jinno *et al.* [2]. In the fixed grid case, 400 Gbps channel demands are served with four 100 Gbps channels, therefore using 4 lambda channels (200 GHz in total in case of 50GHz grid).

Demanded channel	SSON (Flexi-Grid)			WSON (Fixed 50 GHz Grid)			Gain
	Modulation format	m	S (spectrum)	Modulation format	lambdas	S (spectrum)	
10 Gbps	NRZ-OOK SE=1bit/symbol GB=7GHz	2	25 GHz	NRZ-OOK SE=1bit/symbol GB=7GHz	1	50 GHz	100%
40 Gbps	DP-QPSK SE=4bits/symbol 1 GB= 7GHz	2	25 GHz	DP-QPSK SE=4bits/symbol GB= 7GHz	1	50 GHz	100%
100 Gbps	DP-QPSK SE=4bits/symbol 1 GB= 7GHz	3	37.5 GHz	DP-QPSK SE=4bits/symbol GB= 7GHz	1	50 GHz	33.3%
400 Gbps	OFDM-DP-QPSK SE=4bits/symbol 1 GB= 7GHz	10	125 GHz	DP-QPSK SE=4bits/symbol GB= 7GHz	4	200 GHz	60%

Table 1: Spectrum needs of modulation formats

The width of the frequency slot ( $m$ ) is calculated through (1), where  $Bw$  is the bandwidth of the connection in Gbps,  $FEC$  is the % of Forward Error Correction overhead,  $SE$  is the spectral efficiency and  $GuardBand$  is the guard band needed between signals. Let us remark that slot granularity is assumed to be 12,5GHz as defined in ITU.

$$m = (((Bw * (1 + FEC))/SE) + GuardBand)/(12.5) \quad (1)$$

Table 1 shows the theoretical capacity gain for each connection type, which is directly obtained from the spectrum occupation. This capacity increase does not take into account

the network constrains and the Routing and Wavelength Assignment (RWA) in the WSON case, and the Routing and Spectrum Assignment (RSA) in the Flexible grid case. Thus, in a first exercise, the expected theoretical gain is validated computing the total capacity served by the Spanish reference network (see Figure 1) [9] in both cases SSON and WSON. With this aim, the Spanish reference network is filled with connections of 10, 40, 100 and 400 Gbps until the capacity is exhausted. These connections follow the real traffic distribution based on the 2012 Spain Network traffic demands.

The results, shown in Figure 2, are obtained with 1000 simulations with different order of connection arrival. The 95% confidence intervals have been measured. These confidence intervals are bellow 1% of the mean value, so they are not shown in the figure. The black bars show the maximum network capacity in Tbps of the Spanish reference network [9] when WSON is used and the network is filled with connections of a given capacity (either 10/40/100/100). The red bars show the maximum network capacity for the SSON case, and on top of the red bar it is shown the capacity gain with regards to the fixed-grid case. The results show that, when optical connections using DP-QPSK modulation format are used, the total network capacity can be increased by 34% using 100 Gbps channels, or by 65% in case 400 Gbps channels are used. The obtained results are coherent with theoretical values of Table 1, with at most a 5% difference due to the RWA/RSA process in this scenario.

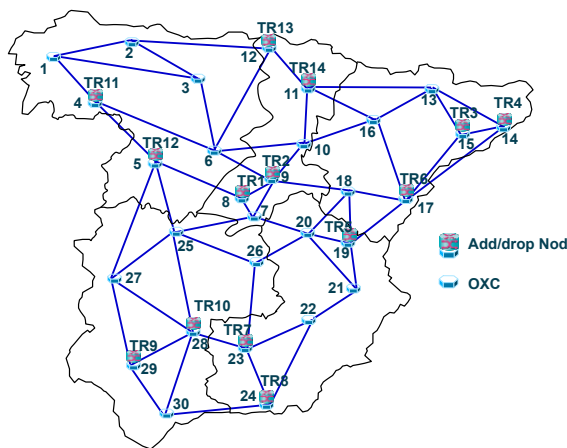


Figure 1 Reference network based on Spanish national backbone [9]

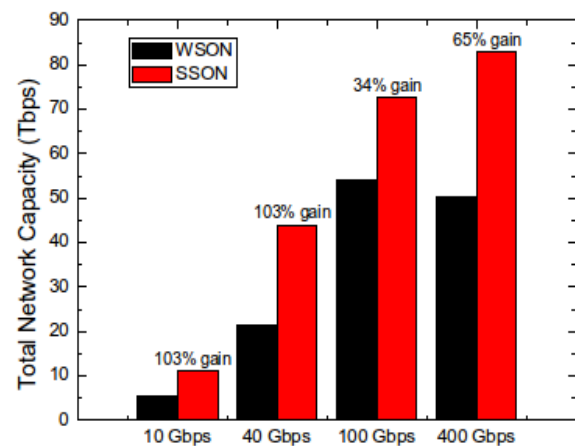


Figure 2 Capacity Gain SSON vs. WSON and total network capacity filling the network with different types of optical channels

The total capacity increment using SSON, in combination with the possibility of introduce the transmission beyond 100G in long haul reaches, are consistent reasons to motivate a technology step onto EON concepts. However, from the network operator perspective, it is important to know when this augment of capacity will represent a real solution for their networks, in other words, when the network capacity will be a problem.

### 3. Evolution strategies of current fixed-grid Network

This section studies the evolution of a national optical transport network comparing a strategy that follows current fixed grid architecture (WSON strategy) and an alternative strategy where flexi-grid architecture is implemented (SSON strategy). Specifically, it is intended to determine the year when the installed capacity will be depleted and new optical links would need to be deployed. This information will be useful in order to check if the capacity gain given by the introduction of Flexi-grid is a necessity in the coming years and if it is worth to implement Flexi-grid in a real network.

In this paper we will use the term WSON to refer to the fixed grid-based architecture. This WSON evolution model represents the continuity of the already deployed infrastructure. On the other side, the SSON model represents a scenario where the Flexi-grid capability is present. There are two possible cases in the SSON model: 1) it is possible to activate the Flexi-grid functionality in the WSSs by a software upgrade, 2) the deployed WSSs can not implement flexi-grid capability and would need to be replaced, this can be considered as a Greenfield scenario. This section considers the case where WSSs are upgradable, while the next section, dealing with migration strategies, considers both cases.

### 3.1 Reference scenario

This subsection describes the reference scenario used in the comparison of the WSON and SSON evolution models. The reference network is, as in the previous study, the Spain Reference Transport network publicly available in [9] and shown in Figure 1. The network is a mesh of transport nodes, specifically, Reconfigurable Add-Drop Multiplexers (ROADMs). The study assumes that all the traffic demand comes from the IP network, and that each IP router is connected to a couple of transport nodes for protection purposes).

The same traffic pattern and annual traffic growth is applied to both evolution models. The initial static traffic matrix is based on the current Spanish Network traffic demands and shows the demand between IP routers. Then, a fixed annual traffic growth of 30% has been assumed, based on the traffic forecasts, to obtain the yearly traffic matrix. The total yearly demand is first satisfied using the existing optical connections in the network and, if the existing channels do not fulfil all the capacity needed, new optical connections are established until all the capacity is transported. When the spectral resources are exhausted and no more optical channels can be established, new switching optical equipment and new fibres will be introduced to upgrade the capacity of the network in order to accept more demands. The study assumes the same level of protection requirements as in current networks. Each demand between two IP routers is served by two link and node disjoint optical channels. Additionally, half of the optical channels are also protected to provide additional survivability guarantees.

The reference scenario considers that the initial deployed DWDM optical channels are based on 10 Gbps OOK-NRZ and 40 Gbps DP-QPSK lambda-based optical channels (*lightpaths*). It is foreseen that in the next years the capacity transmission of the available commercial transponders will increase to 100 Gbps and beyond. Table 2 shows a forecast of the commercial availability of the transmission technologies and the spectrum needs and maximum reach of each technology (obtained from [2], [7], [8], [10]). In the study, a given technology will only be used after the forecasted year of release.

Transmission technology	Number 12.5 GHz slots / Spectrum	Distance (Km)	Year Of Release
OOK-NRZ – 10 Gbps	2 / 25 GHz	2200	Commercially available
DP-QPSK – 40 Gbps	2 / 25 GHz	2800	Commercially available
DP-QPSK – 100 Gbps	3 / 37.5 GHz	2800	2015
OFDM - DP- QPSK - 400 Gbps	10 / 125 GHz	3560	2017
OFDM - DP- QPSK – 1 Tbps	24/300 GHz	3560	2019

Table 2: Compendium transmission technologies: spectrum needs, maximum reach and year of commercial availability.

However, not all these transmission technologies can be supported in the WSON evolution model due to their spectrum requirements (shown in Table 2). For example,

transmissions above 100 Gbps using DP-QPSK or OFDM-DP-QPSK modulation formats are not possible within the fixed 50 GHz ITU grid. Although there are high spectral-efficient modulation formats such as DP-16-QAM that could fit within the fixed grid, such formats do not have the suitable reach for long haul networks [10].

The study has been developed assuming that CDC-ROADMs (Colorless, Directionless, Contention-less) are deployed in the network. The ROADM configuration follows the standard broadcast and select architecture based on WSSs [11]. It is assumed that the routes can be automatically configured between any two nodes and no regeneration is needed with the types of signals used. The contention-less functionality allows that the same wavelength can be added/dropped to/from two or more different directions (incoming links to the node). From the network planning perspective, it implies that the only one restriction is that two different channels cannot share the same spectral resources of the same link.

The addition of a new degree to a deployed ROADM occurs when the spectral resources of an attached fibre are exhausted and consequently it is impossible to route a new channel through it. In this case, it is necessary to activate a new parallel fibre in the link between the ROADMs.

### 3.2 Network Evolution results.

The study assumes an initial ROADM deployment and an initial set of 10 Gbps and 40 Gbps given by the reference scenario. After the initial deployment, the network grows, on the one hand, following the WSON model and on the other hand, following the SSON model. The study compares the number of new long haul links that need to be activated following each strategy.

A heuristic RWA/RSA algorithm for WSON and SSON architectures respectively has been used for the path calculation and resource (wavelength/spectrum) assignment of the optical channels. The algorithm for the WSON model is the Adaptive Unconstrained Routing Exhaustive (AUR-E) [12] RWA algorithm. For the SSON case such algorithm has been adapted to solve the RSA problem.

Figure 3 shows the number of activations of new links needed up to a given year in both evolution models. It can be seen that the capacity of the deployed network will be exhausted by 2019 when the WSON evolution model is followed. However, by the activation of the Flexi-grid functionality the lifetime of the network is extended 5 years. This life extension in the SSON evolution model is due to both the use of high efficient modulation formats beyond 100Gbps and the adjusted spectrum assignment.

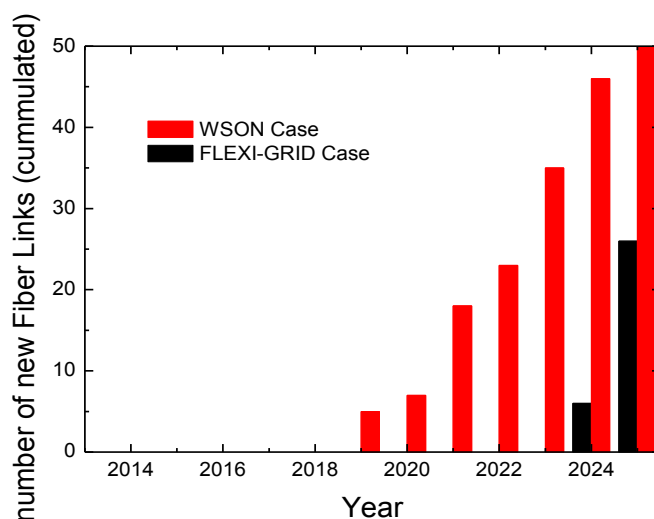


Figure 3 Number of new Fiber Links WSON vs Flexi-grid evolution models



## 4. Migration strategies

In the previous section it has been analysed and compared the evolution of the network following a pure WSON evolution model and a Flexi-grid evolution model, focusing on finding the time when the capacity is exhausted. This section quantifies the number of WSSs and transponders of different types following the WSON and the SSON evolution models.

The Flexi-grid evolution model considered in the previous section that the deployed WSSs in the network are flexi-ready and that by a software upgrade they can be reconverted to Flexible WSSs. In that case, the operator can choose at any time to migrate to flexi-grid. This section also addresses the case where the deployed WSSs cannot be upgraded to support flexible bandwidth channels switching and when the capacity is exhausted, instead of adding degrees to the existing ROADMs, new Flexi-grid ROADMs are deployed. In this mixed WSON-SSON scenario, the introduction of Flexi-grid technology implies a whole parallel transport network deployment with flexi-grid capable equipment. In this evolution scenario, the Flexi-grid and Fixed grid based networks would need to operate together in parallel, introducing new planning and operational challenges from the network operator perspective.

### 4.1 *Evolution strategy towards Flexi-grid when deployed WSSs are not Flexi-grid capable*

In the evolution model where the deployed WSSs are not Flexi-grid capable, the annual incoming demands are served by DWDM channels in the WSON network until a demand cannot be satisfied (no path is found for the requested optical channel). At this point, a migration strategy is followed towards a new flexi-grid network. The migration steps are done sequentially, creating only new flexi-grid links when the WSON network cannot allocate a new optical channel.

In the migration process, the demands are first tried to be allocated in the WSON network, in order to maximize the use of its available capacity. The demand in the WSON network is divided into channels that fit in the 50 GHz grid. When the channel demand cannot be satisfied in the WSON network, the optical channels are tried to be set-up in the SSON network. If in the SSON network there is no space, new ROADMs and links are deployed.

### 4.2 *CAPEX Results*

In order to be able to compare which is the most appropriate evolution strategy, this section quantifies the equipment necessary in every year of the network. The study does not assume any cost pricing for non-commercial transponders, as any specific cost assumption would bias the results. The performed network planning obtains the equipment necessary in the network in order to carry out the full traffic demands. The considered equipment is the total number of WSS required in each network evolution model and the number and type of transponders required to support the optical channels.

Figure 4 shows the number of WSSs used for the express switching (there is one WSS per ROADM degree) and the number of WSSs for the ADD/DROP chains. It can be seen that, as expected, the SSON evolution model that considered non flexi-grid capable ROADMs lead to a high number of WSSs for the express switching, as it is deployed a parallel network. Considering the number of WSSs, all the strategies follow the same pattern until 2019. At this point, the SSON non-flexi ready case needs to make a big investment due to the new parallel SSON network. However, in the long run, the WSON evolution strategy needs more WSSs in the add/drop chains than both SSON models, as it is

needs to keep using a high number of transponders of 100 Gbps, while the SSON models can use less transponders (but with higher capacity), as shown in Figure 6. The WSSs needs are obtained following the node model defined in [9].

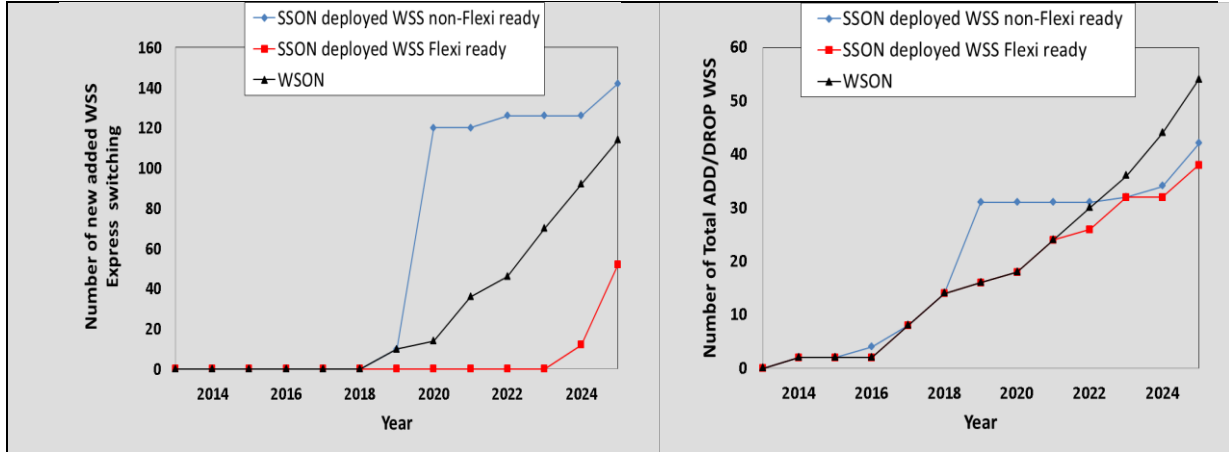


Figure 4: a) Number of 1x9 WSS in express switching, b) number of 1x20 WSS in the add/drop chain.

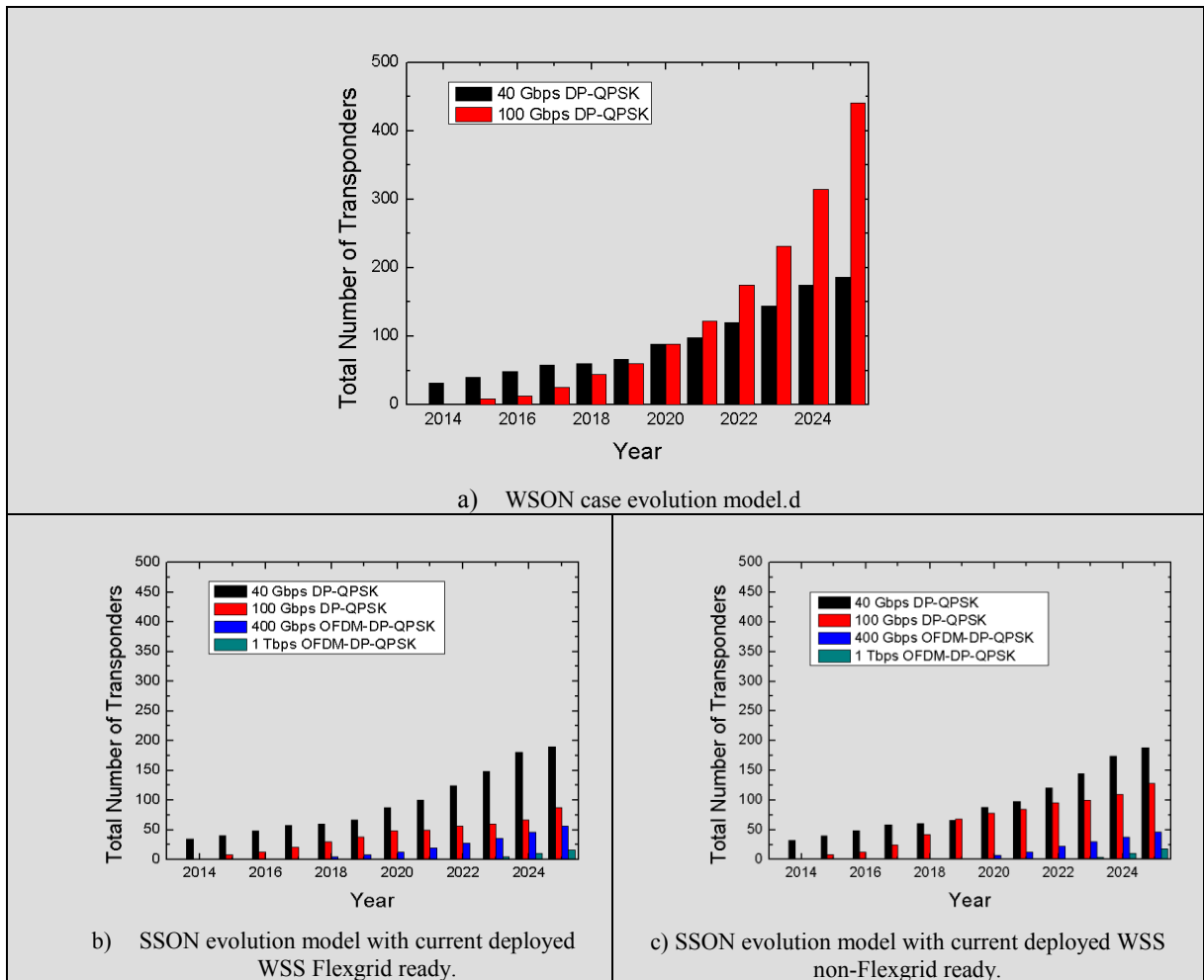


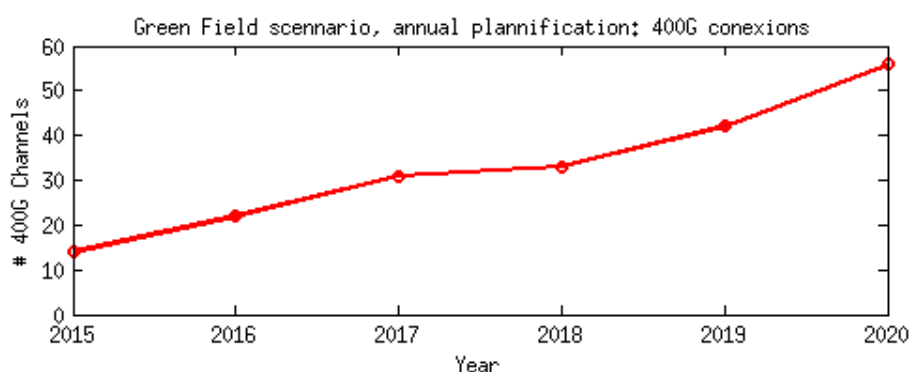
Figure 5: Total number of transponders by sort in each case.

The number of transponders is shown in Figure 5. It can be observed that the number of 100G transponders in the WSON evolution model (see Figure 5c) exponentially increases. In the other two models, with the Flexi-grid introduction and therefore higher capacity channels inclusion, the increment in the number of transponders (and the add/drop

equipment in general) is more gradual. However, as realistic costs of higher capacity transponders beyond 100G are not yet available, the study is focused on presenting the number of transponders, so target costs can be easily obtained to know if flexi-grid is necessary or not. If high-speed transponders achieve a high level of cost-efficiency vs 100 Gbps transponders, the cost to upgrade the network after 2020 using Flexi-grid will be lower, even considering the worst-case where new Flexi-grid equipment needs to be deployed.

## 5. Flexi-grid as enabler of 400G Transmission

A short term driver for Flexi-Grid might be the appearance of 400Gbps client signals and cost effective 400Gbps transponders. In this case study it is obtained, for the Telefonica of Spain core transport network, the number of 400Gbps demands that could be needed in the following years, with a 30% yearly traffic increase, maintaining the same traffic distribution. Figure 4 shows the number of forecasted demand of 400 Gbps per year.



*Figure 6 Number of 400G channels per year*

There are two main choices for 400 Gbps transmission: 400G transmission based on OFDM-DP-QPSK over 125GHz. The reach of each subcarrier modulation format (DP-QPSK) would enable long haul deployments. However, as 125 GHz are needed, it is only feasible using flexi-grid technology. The other option is split the demand in two wavelengths with DP-16QAM 200Gbps over standard Fixed 50GHz grid. However, in this case, the reach is lower. Taking into account the length and number of ROADMs of the long haul routes in Telefonica of Spain Network, approximately at least 30% of the 400 Gbps transmission using DP-16QAM would need regeneration. Such regeneration can be avoided by using OFDM-DP-QSK and enabling flexi-grid.

## 6. Conclusions

The study has compared the evolution of a national level optical transport network based on the current Fixed grid WSON approach and the newly proposed Flexi-grid approach. The results show that a network based on Flexgrid could extend the lifetime of the network 5 years with respect to the legacy WSON. Results also show that current WSON capacity will not be exhausted until 2019.

The limitation on the maximum capacity that can be carried in a single lambda causes a dramatic increase in 100 Gbps optical channels in case the network grows following a WSON model. If the network is migrated to flexi-grid, the number of transponders is reduced. In the case that the deployed network is based on WSSs that are not Flexi-grid capable, a mixed WSON-SSON strategy has been presented. Such strategy implies starting to deploy a parallel SSON Network when the capacity of the WSON network is exhausted. At the expenses of the deployment of the parallel network, the number of transponders is



drastically reduced compared to keep on the WSON network, which needs to grow adding parallel links and increasing the degree of the ROADMs.

Even though in the next years capacity in terms of spectrum is not yet an issue, and thus migrating to flexi-grid just because of the lack of spectrum makes is not urgent, a key driver to migrate to flexi-grid is the demand of high speed channels and the availability of cost-effective 400Gbs and 1Tbps transponders.

## References

- [1] International Telecommunications Union, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid," *ITU-T Recommendation G.694.1*, February 2012.
- [2] M. Jinno, H. Takara, H. Watanabe, and Y. Sone, "Distance-Adaptive Spectrum Resource Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Network," *IEEE Communications Magazine*, August 2010.
- [3] International Telecommunications Union, "Architecture of Optical Transport Networks," *ITU-T Recommendation G.872*, October 2012.
- [4] M. Klinkowski et al., "Elastic Spectrum Allocation for Time-Varying Traffic in FlexGrid Optical Networks," *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 1, January 2013.
- [5] T. Tanaka and A. Jinno, M. Hirano, "Performance Evaluation of Elastic Optical Networks with Multi-Flow Optical Transponders," in *Proceedings of European Conference and Exhibition on Optical Communications*, 2012.
- [6] J. Lopez Vizcaino et al., "Cost Evaluation for Flexible-Grid Optical Networks," in *IEEE Globecom, workshop on Flexible Optical Networks*, Dec 2002.
- [7] P. Winzer, "Modulation and Multiplexing in optical communication systems," *IEEE LEOS Newsletter*, Feb 2009.
- [8] T.J. Xia et al., "Field Experiment with Mixed Line-Rate Transmission (112 Gb/s, 450 Gb/s and 1.15 Tb/s) over 3560 Km of Installed Fiber Using Filterless Coherent Receiver and EDFAs Only," in *Proceedings of OFC/NFOFC*, March 2011.
- [9] STRONGEST, "D2.1 Efficient and optimized network architecture: Requirements and reference scenarios," available at <http://www.ict-strongest.eu>, 2011.
- [10] T.J. Xia, S. Gringeri, and M. Tomizawa, "High-Capacity Optical Transport Networks," *IEEE Communications Magazine*, pp. 170-177, Nov 2012.
- [11] P. Roorda and B. Collings, "Evolution to Colorless and Directionless ROADM Architectures," in *Proceedings of OFC*, March 2008.
- [12] A. Mokhtar and M. Azizoglu, "Adaptive wavelength routing in all-optical networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, no. 2, pp. 197-206, April 1998.



- *Marta Cuaresma, Fernando Muñoz del Nuevo, Sergio Martinez, Arturo Mayoral, Oscar Gonzalez de Dios, Victor Lopez, Fernandez-Palacios Juan Pedro, "Experimental Demonstration of H-PCE with BPG-LS in elastic optical networks", ECOC 2013, paper We.4.E.3 London UK.*

A continuación se adjunta la carta de aceptación de dicha publicación.

---

---

On behalf of the Technical Programme Committee, thank you for submitting your paper to ECOC 2013. The contributions have now been reviewed and I am pleased to inform you that **your paper has been accepted to the conference, as an oral presentation.**

Your session information is as follows:

Control ID: 1715392

Paper title: Experimental Demonstration of H-PCE with BPG-LS in elastic optical networks

Authors: Marta Cuaresma(1); Fernando Muñoz del Nuevo(1); Sergio Martinez(1); Arturo Mayoral(1); Oscar Gonzalez de Dios(1); Victor Lopez(1); Fernandez-Palacios Juan Pedro(1)

Session: Control Plane & PCE

Presentation number: We.4.E.3

Session Date & Times: September 25, 2013 from 4:00 PM to 5:30 PM

Your presentation time: 4:30 PM to 4:45 PM

The additional authors on your paper will not be notified. Kindly disseminate this email to your co-authors, if applicable.

Programme:

NOTE: A full programme will be published on the conference website by the end of July please visit the website regularly for any programme and schedule updates.

All information displayed on the ECOC programme will reflect the information on your submitted PDF paper (title, authors and institution or company).

Your oral presentation:

Please note that your presentation time includes 12 minutes for presentation and 3 minutes for discussion. Time limits for oral presentations are strictly enforced to maintain the conference schedule. Further instructions for oral presenters can be found at [www.ecoc2013.org](http://www.ecoc2013.org)

ECOC 2013 Optics Express Special Issue:

For 2013 it has been decided to give the top ten ranking papers from each subcommittee the opportunity to be published in a special issue of the OSA Journal, Optics Express. You will receive a separate email informing you if your paper has been selected.

Registration:

All authors are required to register by the 18 August. Registration is now open and your registration fee includes attendance at the:

Yours sincerely,  
ECOC 2013 Organisers

# Experimental Demonstration of H-PCE with BGP-LS in elastic optical networks

Marta Cuaresma<sup>(1)</sup>, Fernando Muñoz del Nuevo<sup>(1)</sup>, Sergio Martínez<sup>(1)</sup>, Arturo Mayoral<sup>(1)</sup>, Oscar González de Dios<sup>(1)</sup>, Víctor López<sup>(1)</sup>, Juan Pedro Fernández-Palacios<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Telefónica I+D, GCTO, C/ Don Ramón de la Cruz 84, Madrid, 28006, Spain, Email: [jpfpg@tid.es](mailto:jpfpg@tid.es)

**Abstract** *In the H-PCE architecture the mechanism to build the Traffic Engineering Database of the Parent PCE is not defined. This work validates the use of BGP-LS to feed the TED and compares two algorithms that use different amount of information.*

## Introduction

The International Engineering Task Force (IETF) has defined the Path Computation Element architecture as a framework capable of solving the path computation problem in complex environments, such as multi-domain transport networks. Mechanisms such as Per-Domain Path Computation, Backward Recursive PCE based Computation (BRPC) and Hierarchical PCE (H-PCE) have been proposed to solve the multi-domain path computation by means of cooperation among different PCEs [1]. The H-PCE architecture is appointed the preferred solution, as it is able to compute optimum end-to-end paths and does not need to have the sequence of domains already fixed.

Current solution draft for the H-PCE [2] is focused on the path computation procedures and the PCEP protocol extensions. However, neither the architecture nor the solution draft define the mechanism that needs to be used to build and populate the parent PCE Traffic Engineering Database (TED). Authors in [3] propose to use PCEP Notifications embedding OSPF-TE Link State Advertisements (LSA) to send the Inter-Domain Link information from child PCEs (cPCEs) to the parent PCE and PCEP Notifications to send reachability information (list of end-points in each domain). This approach has also been experimentally validated in multi-partner testbeds, for a multi-domain WSON scenario in [4] and in a multi-layer multi-domain OBS-WSON scenario in [5]. The main drawbacks of this approach are that it is a non-standard approach and it is not within the scope of PCEP. Furthermore, authors in [6] propose to send aggregated intra-domain topology information in the PCEP notifications. Another approach is to maintain an IGP adjacency between child PCEs and parent PCEs exchanging inter-domain information.

It has been recently proposed in the IETF the North-Bound Distribution of Link-State and TE Information using BGP [7]. This approach is known as BGP-LS and defines a mechanism by which links state and traffic engineering

information can be collected from networks and exported to external elements using the BGP routing protocol. In this paper we investigate the use of BGP-LS in the Hierarchical PCE architecture. To validate its use, we have implemented BGP-LS speakers in both child PCE and parent PCE. In particular, this paper is focused on a multi-domain elastic optical network scenario, so extensions for both PCEP and BGP-LS for elastic optical networks are also implemented. BGP-LS allows a fine control of the amount of information sent. This paper studies two H-PCE procedures that use different amount of information in the parent PCE. In one case, only domain connectivity details are used, and in the other case, BGP-LS is configured to send both intra-domain and inter-domain topologies, giving richer information to the PCE. The paper is organized as follows. First of all, the H-PCE architecture with BGP-LS is presented. Next, the proposed approach of how to use BGP-LS to exchange information of elastic optical network is explained. Next, the experimental set-up is explained and performance results are shown.

## H-PCE architecture with BGP-LS

The Hierarchical PCE architecture with BGP-LS is shown in Fig. 1. Each domain has a child PCE (cPCE) that is able to compute paths in the domain. This child PCE has access to a Domain TED, which is built using IGP information. In each domain, a BGP Speaker has access to such domain TED and acts as BGP-LS Route Reflector to provide network topology to the parent PCE (pPCE). Next to the parent PCE, there is a BGP speaker that maintains a BGP session with each of the BGP speakers in the domains to receive the topology and build the parent TED. A policy can be applied to the BGP-LS speakers to decide which information is sent to its peer speaker.

The minimum amount of information that needs to be sent to the parent PCE is the inter-domain connectivity, including the details of the Traffic Engineering Inter-domain Links [1]. With this

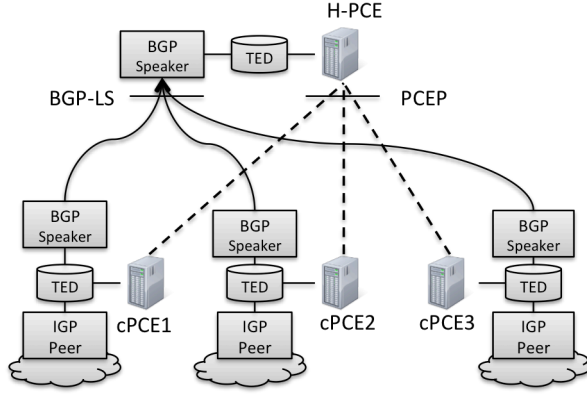


Fig. 1: H-PCE architecture with BGP-LS

information, the parent PCE will be able to have access to a domain topology map and its connectivity. Additionally, the BGP-LS speaker can be configured to send the complete list of TE Links, including its details. In this case, the parent PCE will have access to an extended database, with visibility of both intra-domain and inter-domain information and can compute the sequence of domains with better accuracy. Even, the pPCE could have enough information to compute the whole end-to-end path by itself.

### BGP-LS protocol for multi-domain elastic optical networks

BGP-LS [7] extends the BGP Update messages to advertise link-state topology thanks to new BGP Network Layer Reachability Information (NLRI). In this section we explain how to build the BGP-LS Update messages that contain Inter-domain and intra-domain LSAs. The Link State information is sent in two BGP attributes, the MP\_REACH (defined in RFC 4670) and a LINK\_STATE attribute (defined in the BGP-LS draft). To describe both the intra and inter domain links, in the MP\_REACH attribute, we

use a Link NLRI, which contains in the local node descriptors the address of the source, and in the remote descriptors, the address of the destination of the link. The Link Descriptors field has a TLV (Link Local/Remote Identifiers), which carries the prefix of the Unnumbered Interface. In case of the message informs about an intra-domain link, the standard traffic engineering information is included in the LINK\_STATE attribute. In addition, the Available Labels TLV [8] is added to the LINK\_STATE to include the availability of the frequency slots.

### Experimental validation

We have implemented the H-PCE architecture with BGP-LS shown in Fig. 1. The network scenario used for the validation and the performance is a multi-domain elastic optical network. This implemented scenario has three network domains, each with seven network elements and one cPCE. All nodes are virtual machines in a server with two processor Intel Xeon E5-2630 2.30GHz (6 cores each) and 192 GB RAM. Using the netem tool, a delay of 25 ms is added between all network elements (that is between nodes and its cPCE and between cPCE and pPCE). As example of the functional validation, the Wireshark capture in Fig. 2 depicts the part of the BGP-LS message

12	26.203094	192.168.1.200	192.168.1.201	BGP	OPEN Message
14	26.215737	192.168.1.201	192.168.1.200	BGP	OPEN Message
20	26.260332	192.168.1.201	192.168.1.200	BGP	KEEPALIVE Message
21	26.264338	192.168.1.200	192.168.1.201	BGP	KEEPALIVE Message
164	62.572986	192.168.2.200	192.168.1.201	BGP	OPEN Message
166	62.596196	192.168.1.201	192.168.2.200	BGP	OPEN Message
168	62.600891	192.168.1.201	192.168.2.200	BGP	KEEPALIVE Message
174	62.632379	192.168.2.200	192.168.1.201	BGP	KEEPALIVE Message
464	101.332796	192.168.3.200	192.168.1.201	BGP	OPEN Message
465	101.346238	192.168.1.201	192.168.3.200	BGP	OPEN Message
469	101.361512	192.168.1.201	192.168.3.200	BGP	KEEPALIVE Message
472	101.383922	192.168.3.200	192.168.1.201	BGP	KEEPALIVE Message
484	102.533076	192.168.2.200	192.168.1.201	BGP	UPDATE Message
485	102.543051	192.168.2.200	192.168.1.201	BGP	UPDATE Message

Fig. 2: BGP-LS message exchange

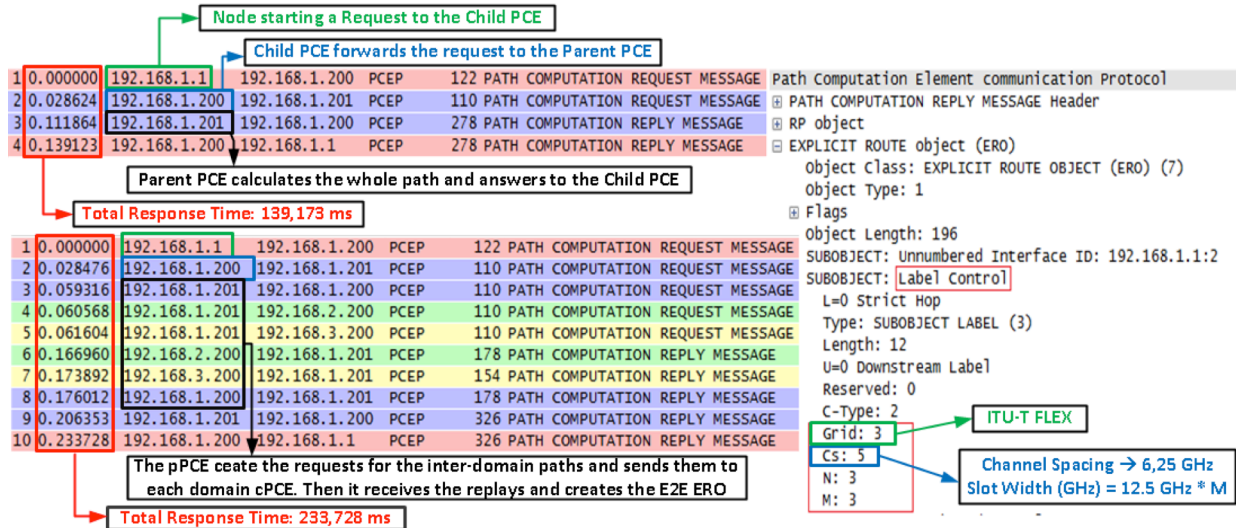
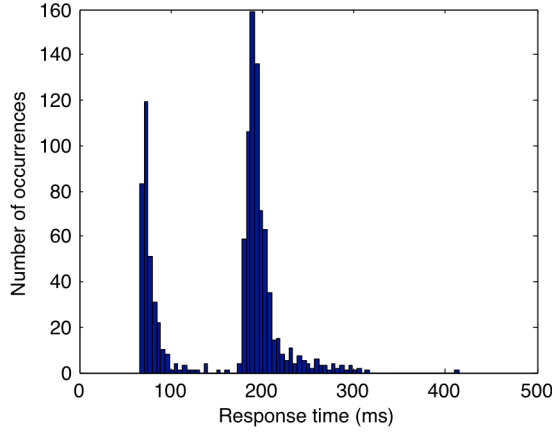


Fig. 3: PCEP message flow for a multi-domain request with LMDMTD (top left) and with DMDMTD (bottom left). Detailed ERO object (right)

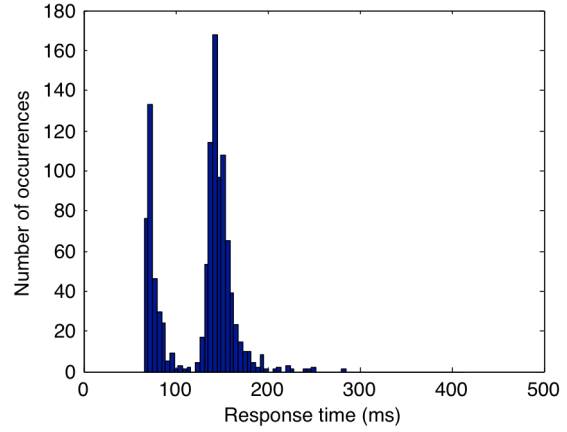


**Fig. 4:** Relative frequency histogram for the response time for DMDMTD algorithm

exchange to feed the pPCE topology/TED and Fig. 3 the PCEP message exchange to request multi-domain paths in H-PCE network architecture for two algorithms, explained below. The PCEP message flow (Fig. 3) starts with the request from the source transport node to the cPCE asking for a SSON path. Since the destination is not located at the source domain, the cPCE forwards the request using the same parameters. Two algorithms are implemented. In the Local Multi-Domain Minimum Transit Domains (LMDMTD), BGP policy is configured to send all the topology, and the parent PCE computes the shortest domain sequence, and then, for each domain, in parallel, applies a RSA algorithm (Fig. 3, upper left). In the Distributed Multi-Domain Minimum Transit Domains (DMDMTD), the classical H-PCE procedure in which the child PCEs are queried is followed (Fig. 3, lower left). The cPCEs use the same RSA as in the LMDMTD case. The end-to-end ERO composed by the pPCE is shown in Fig. 3 right, including the frequency slot labels [9].

### Performance evaluation

To assess the performance, 1000 requests of 100 Gpbs connections are generated between every pair of nodes. Thus, both intra-domain and multi-domain requests are generated. In this paper, computation times are measured for each algorithm (resource reservation time in the control plane is not included) from the time when the node sends the PCReq until it receives the PCRep. Fig. 4 presents the histogram of the total response time for the DMDMTD algorithm. The main source of response time comes from the delays between node and cPCE (50 ms RTT) and between cPCEs and pPCE (50 ms RTT). Fig. 5 shows the histogram of the other procedure of computing multi-domain paths (LMDMTD) in which all the necessary information is provided to the pPCE by BGP-LS.



**Fig. 5:** Relative frequency histogram for the response time for LMDMTD algorithm

The pPCE computes the whole path itself avoiding the communication with the cPCEs for each intra-domain ERO computation. The pPCE is able to perform in parallel the domain RSAs without much penalty and needs in total less time than DMDMTD, 20% less, because there is no propagation delay as consequence of the multiple domain requests between the pPCE and the cPCEs.

### Conclusions

The use of BGP-LS in the Hierarchical PCE architecture has been experimentally validated. Two policies in BGP-LS were tested, one sending only inter-domain information and another sending the full topology. When the pPCE used the full topology, a 20% reduction in the computing time was achieved due to less cPCE-pPCE interactions.

### Acknowledgements

The research leading to these results has received funding from the European Community's Seventh Framework Programme under grant agreement n° 317999 (IDEALIST project).

### References

- [1] D. King and A. Farrel, RFC 6805, Nov 2012
- [2] F. Zhang *et al.* draft-zhang-pce-hierarchy-extensions-03, Feb 2013
- [3] R. Casellas *et al.*, OTh15, OFC 2011
- [4] F. Paoluci *et al.*, OM3G.3, OFC 2012.
- [5] O. Gonzalez de Dios *et al.*, OTh1H.2, OFC 2013
- [6] R. Casellas *et al.*, Optics Express, Vol. 19, Issue 26, pp. B611-B620, 2011
- [7] Gredler *et al.* draft-ietf-idr-ls-distribution-02, Feb 2013
- [8] G. Bernstein *et al.* draft-ietf-ccamp-general-constraint-encode-10, Nov 2012.
- [9] Farrel *et al.* draft-farrkingel-ccamp-flexigrid-lambda-label-05, April 2013

## **C PRESUPUESTO**

El presupuesto va ser desglosado en los siguientes apartados:

- (1) Recursos Materiales
- (2) Costes de Mano de obra
- (3) Gastos generales y beneficio industrial
- (4) Presupuesto Total

### **(1) Recursos Materiales**

En primer lugar se van a desglosar los costes del proyecto, asociados al equipamiento y materiales necesarios para la realización del mismo. La primera tabla desglosa los costes asociados a licencias y programas que se han requerido para el desarrollo del proyecto. El coste de estos recursos, esta expresado en su cuantía anual. En este caso, al tratarse de recursos que seguirán siendo utilizados en otros proyectos al finalizar el presente, el coste real se ha calculado en función del tiempo que han sido utilizados.

<b>Recursos Software</b>			
<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>	<b>Meses</b>	<b>Coste real</b>
Sistema Operativo Windows 7 Enterprise 32 bits	269,00	4	89,99
Sistema Operativo Linux 12.04 32 bits	0,00	14	0,00
Sistema operativo Ubuntu Server 10.4 64 bits	0,00	14	0,00
Microsoft Office 2010	452,19	4	150,66
Microsoft Visio 2010	725,00	2	120,83
Matlab & Simulink Student Version	99,00	12	99,00
Eclipse SDK versión 3.7.2	0,00	14	0,00
<b>Total recursos Software</b>			<b>460,48 €</b>

**Tabla C-1: Gastos en recursos Software**

<b>Recursos Hardware</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
Ordenador Personal – Modelo Dell Optiplex 745 Intel® Core (TM)2 CPU 4400 @ 2200GHz 2.00GHz	449,00
Monitor 17 pulgadas – Dell 1707Fpt	120,00
Servidor externo – Dell PowerEdge R310 Intel(R) Xeon(R) CPU X3430 @ 2.40GHz	990,00
<b>Total recursos Hardware</b>	<b>1.559,00</b>

**Tabla C-2: Gastos en recursos Hardware**



<b>Recursos Material</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
Recursos Software	460,48
Recursos Hardware	1.559,00
Material fungible y de Oficina	100,00
<b>Total</b>	<b>2.119,48</b>

**Tabla C-3: Gastos en recursos materiales.**

## **(2) Costes de mano de obra**

Para la realización del proyecto han sido necesarios los siguientes perfiles profesionales:

- Un Ingeniero Superior de Telecomunicación, encargado de la investigación, desarrollo e implementación del trabajo técnico. (IST)
- Un Doctor en Ingeniería de Telecomunicación, encargado de la dirección del proyecto y de la presentación de los resultados obtenidos en el ámbito científico internacional. (DIT)

### **➤ Planificación del proyecto**

Para una mayor claridad a lo hora de entender y procesar los costes asociados a la mano de obra del proyecto, se va a desglosar una planificación detallada en tareas del Proyecto Fin de Carrera. En primer lugar se va a realizar una descomposición, en tareas, del trabajo realizado en el presente Trabajo de Fin de Carrera y a continuación un desglose de los hitos del proyecto y su duración temporal mediante un diagrama de Gant.

La duración de todas las tareas vendrá expresada en meses.

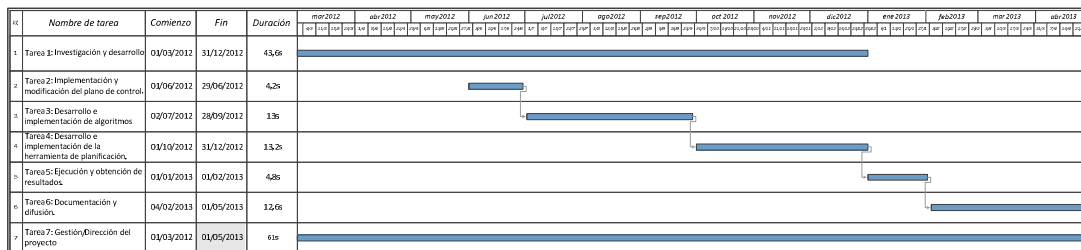
<b>Organigrama de tareas del Proyecto</b>			
<b>Tarea</b>	<b>Descripción</b>	<b>Esfuerzo</b>	<b>Duración</b>
1- Investigación y desarrollo.	Es esta primera etapa se realizó un estudio exhaustivo de toda la arquitectura de las redes elásticas, algoritmos de planificación, estándares del plano de control y estudios concluyentes relacionados. Durante el resto del proyecto se continuó revisando el estado del arte de las redes elásticas y de la tecnología óptica en general.	IST - 0,5 personas/mes.	10
2- Implementación y modificación del plano de control.	Aquí se realizó todo el proceso de mejora, innovación e implementación de los cambios necesarios, tanto en el protocolo PCEP como en el plano de control GMPLS, para introducir la conmutación flexible de espectro dentro del plano de control.	IST - 0,5 personas/mes.	1



3- Desarrollo e implementación de algoritmos.	Esta etapa corresponde tanto al desarrollo como a la implementación de los algoritmos descritos en el capítulo 4, tanto en el PCE como posteriormente en la herramienta de planificación.	IST - 0,5 personas/mes.	3
4- Desarrollo e implementación de la herramienta de planificación.	Desarrollo modular de la herramienta de planificación. Implementación en lenguaje orientado a objetos de la misma y testeo y validación de la misma.	IST - 0,5 personas/mes.	3
5- Ejecución y obtención de resultados.	Ejecución de los algoritmos de planificación desarrollados en la herramienta de planificación. Obtención y validación de resultados mediante Matlab y Excel.	IST - 1 personas/mes.	1
6- Documentación y difusión.	Redacción del presente documento, así como de las publicaciones adjuntas y realización de demostraciones del funcionamiento del plano de control PCE+GMPLS para redes elásticas.	IST - 1 personas/mes.	3
7- Gestión/Dirección del Proyecto	Gestión y evaluación de todas las tareas desarrolladas en el proyecto	DIT – 0,15 personas/mes.	14

**Tabla C-4: Planificación del proyecto desglosado en tareas.**

En total el proyecto ha tenido una duración total de 14 meses. La duración del mismo ha sido bastante superior a lo estimado en el anteproyecto. Esto se debe principalmente al trabajo desempeñado en las tareas de implementación del plano de control para las redes elásticas y por la realización del trabajo de difusión en conferencias del trabajo realizado.



**Tabla C-5: Planificación del proyecto. Diagrama de Gant.**

### ➤ Costes asociados a la mano de obra

Una vez detallada la planificación del proyecto, se van a presentar los costes asociados a la mano de obra del mismo.

La estimación de los costes se realiza en base a los siguientes datos:

- Cotizaciones según el Régimen General de la Seguridad Social. Tanto el ingeniero

Superior de Telecomunicación como el Doctor Ingeniero de Telecomunicación pertenece al grupo 1.

- Jornada laboral de 8 horas/día y 21 días laborales/mes.

Con estos datos y la planificación mostrada anteriormente se ha realizado la siguiente tabla:

<b>Costes Salariales</b>		
<b>Concepto</b>	<b>Grupo 1</b>	
	<b>IST</b>	<b>DIT</b>
Base cotizable máxima anual	41.108,40	41.108,40
Contingencias comunes (23.6%)	9.701,58	9.701,58
Desempleo, F.G.S y Formación profesional (7.75%)	3.185,90	3.185,90
Accidentes de trabajo y enfermedades profesionales	3.425,70	3.425,70
Coste de la seguridad social	16.313,18	16.313,18
Salario bruto anual	36.000,00	42.000,00
Coste salarial anual	52.313,18	58.313,18
Coste salarial por hora	25,95	28,92
Número de horas	2100	353
<b>Coste Total</b>	<b>54.495,00</b>	<b>10.208,76</b>

**Tabla C-6: Costes Salariales.**

<b>Mano de obra</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
Ingeniero superior de telecomunicación	54.495,00
Doctor Ingeniero de telecomunicación	10.208,76
<b>Coste Total</b>	<b>64.703,76</b>

**Tabla C-7: Costes de mano de obra.**

### **(3) Gastos generales y beneficio industrial.**

Bajo gastos generales se encuentran todos aquellos gastos derivados del uso de las instalaciones, cargas fiduciarias, amortizaciones, gastos fiscales etc...

<b>Presupuesto de ejecución por contrata</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
<b>Presupuesto de ejecución material</b>	
Costes de mano de obra	64.703,76
Gastos en recursos Materiales	2.119,48
<b>Subtotal</b>	<b>66.823,24</b>

Gastos generales (13% del P.E.M)	8.687,02
Beneficio industrial (6% del P.E.M)	4.009,39
<b>Total presupuesto de ejecución por contrata</b>	<b>79.519,63</b>

**Tabla C-8: Presupuesto de ejecución por contrata.**

**(4) Presupuesto total.**

Finalmente si sumamos todos los conceptos anteriores y le aplicamos el 21% de I.V.A según el REAL DECRETO-LEY 20/2012, se obtiene el presupuesto final.

<b>Presupuesto total</b>	
<b>Concepto</b>	<b>Coste</b>
Presupuesto de ejecución por contrata	79.519,63
I.V.A (21%)	16.699,12
<b>TOTAL</b>	<b>96.218,75</b>

**Tabla C-9: Presupuesto Total.**

Madrid, 26 de Junio de 2013

Madrid, Julio de 2013

El Ingeniero Jefe de Proyecto

Fdo.: Arturo Mayoral López de Lerma  
Ingeniero Superior de Telecomunicación

## **PLIEGO DE CONDICIONES**

Este documento contiene las condiciones legales que guiarán la realización, en este proyecto, de Algoritmos de planificación para redes elásticas. En lo que sigue, se supondrá que el proyecto ha sido encargado por una empresa cliente a una empresa consultora con la finalidad de realizar dicho sistema. Dicha empresa ha debido desarrollar una línea de investigación con objeto de elaborar el proyecto. Esta línea de investigación, junto con el posterior desarrollo de los programas está amparada por las condiciones particulares del siguiente pliego.

Supuesto que la utilización industrial de los métodos recogidos en el presente proyecto ha sido decidida por parte de la empresa cliente o de otras, la obra a realizar se regulará por las siguientes:

### **Condiciones generales**

1. La modalidad de contratación será el concurso. La adjudicación se hará, por tanto, a la proposición más favorable sin atender exclusivamente al valor económico, dependiendo de las mayores garantías ofrecidas. La empresa que somete el proyecto a concurso se reserva el derecho a declararlo desierto.

2. El montaje y mecanización completa de los equipos que intervengan será realizado totalmente por la empresa licitadora.

3. En la oferta, se hará constar el precio total por el que se compromete a realizar la obra y el tanto por ciento de baja que supone este precio en relación con un importe límite si este se hubiera fijado.

4. La obra se realizará bajo la dirección técnica de un Ingeniero Superior de Telecomunicación, auxiliado por el número de Ingenieros Técnicos y Programadores que se estime preciso para el desarrollo de la misma.

5. Aparte del Ingeniero Director, el contratista tendrá derecho a contratar al resto del personal, pudiendo ceder esta prerrogativa a favor del Ingeniero Director, quien no estará obligado a aceptarla.

6. El contratista tiene derecho a sacar copias a su costa de los planos, pliego de condiciones y presupuestos. El Ingeniero autor del proyecto autorizará con su firma las copias solicitadas por el contratista después de confrontarlas.

7. Se abonará al contratista la obra que realmente ejecute con sujeción al proyecto que sirvió de base para la contratación, a las modificaciones autorizadas por la superioridad o a las órdenes que con arreglo a sus facultades le hayan comunicado por escrito al Ingeniero Director de obras siempre que dicha obra se haya ajustado a los preceptos de los pliegos de condiciones, con arreglo a los cuales, se harán las modificaciones y la valoración de las diversas unidades sin que el importe total pueda exceder de los presupuestos aprobados. Por consiguiente, el número de

unidades que se consignan en el proyecto o en el presupuesto, no podrá servirle de fundamento para entablar reclamaciones de ninguna clase, salvo en los casos de rescisión.

8. Tanto en las certificaciones de obras como en la liquidación final, se abonarán los trabajos realizados por el contratista a los precios de ejecución material que figuran en el presupuesto para cada unidad de la obra.

9. Si excepcionalmente se hubiera ejecutado algún trabajo que no se ajustase a las condiciones de la contrata pero que sin embargo es admisible a juicio del Ingeniero Director de obras, se dará conocimiento a la Dirección, proponiendo a la vez la rebaja de precios que el Ingeniero estime justa y si la Dirección resolviera aceptar la obra, quedará el contratista obligado a conformarse con la rebaja acordada.

10. Cuando se juzgue necesario emplear materiales o ejecutar obras que no figuren en el presupuesto de la contrata, se evaluará su importe a los precios asignados a otras obras o materiales análogos si los hubiere y cuando no, se discutirán entre el Ingeniero Director y el contratista, sometiéndolos a la aprobación de la Dirección. Los nuevos precios convenidos por uno u otro procedimiento, se sujetarán siempre al establecido en el punto anterior.

11. Cuando el contratista, con autorización del Ingeniero Director de obras, emplee materiales de calidad más elevada o de mayores dimensiones de lo estipulado en el proyecto, o sustituya una clase de fabricación por otra que tenga asignado mayor precio o ejecute con mayores dimensiones cualquier otra parte de las obras, o en general, introduzca en ellas cualquier modificación que sea beneficiosa a juicio del Ingeniero Director de obras, no tendrá derecho sin embargo, sino a lo que le correspondería si hubiera realizado la obra con estricta sujeción a lo proyectado y contratado.

12. Las cantidades calculadas para obras accesorias, aunque figuren por partida alzada en el presupuesto final (general), no serán abonadas sino a los precios de la contrata, según las condiciones de la misma y los proyectos particulares que para ellas se formen, o en su defecto, por lo que resulte de su medición final.

13. El contratista queda obligado a abonar al Ingeniero autor del proyecto y director de obras así como a los Ingenieros Técnicos, el importe de sus respectivos honorarios facultativos por formación del proyecto, dirección técnica y administración en su caso, con arreglo a las tarifas y honorarios vigentes.

14. Concluida la ejecución de la obra, será reconocida por el Ingeniero Director que a tal efecto designe la empresa.

15. La garantía definitiva será del 4% del presupuesto y la provisional del 2%.

16. La forma de pago será por certificaciones mensuales de la obra ejecutada, de acuerdo con los precios del presupuesto, deducida la baja si la hubiera.

17. La fecha de comienzo de las obras será a partir de los 15 días naturales del replanteo oficial de las mismas y la definitiva, al año de haber ejecutado la provisional, procediéndose si no existe reclamación alguna, a la reclamación de la fianza.

18. Si el contratista al efectuar el replanteo, observase algún error en el proyecto, deberá comunicarlo en el plazo de quince días al Ingeniero Director de obras, pues transcurrido ese plazo será responsable de la exactitud del proyecto.

19. El contratista está obligado a designar una persona responsable que se entenderá con el Ingeniero Director de obras, o con el delegado que éste designe, para todo relacionado con ella. Al ser el Ingeniero Director de obras el que interpreta el proyecto, el contratista deberá consultarle cualquier duda que surja en su realización.

20. Durante la realización de la obra, se girarán visitas de inspección por personal facultativo de la empresa cliente, para hacer las comprobaciones que se crean oportunas. Es obligación del contratista, la conservación de la obra ya ejecutada hasta la recepción de la misma, por lo que el deterioro parcial o total de ella, aunque sea por agentes atmosféricos u otras causas, deberá ser reparado o reconstruido por su cuenta.

21. El contratista, deberá realizar la obra en el plazo mencionado a partir de la fecha del contrato, incurriendo en multa, por retraso de la ejecución siempre que éste no sea debido a causas de fuerza mayor. A la terminación de la obra, se hará una recepción provisional previo reconocimiento y examen por la dirección técnica, el depositario de efectos, el interventor y el jefe de servicio o un representante, estampando su conformidad el contratista.

22. Hecha la recepción provisional, se certificará al contratista el resto de la obra, reservándose la administración el importe de los gastos de conservación de la misma hasta su recepción definitiva y la fianza durante el tiempo señalado como plazo de garantía. La recepción definitiva se hará en las mismas condiciones que la provisional, extendiéndose el acta correspondiente. El Director Técnico propondrá a la Junta Económica la devolución de la fianza al contratista de acuerdo con las condiciones económicas legales establecidas.

### **Condiciones particulares**

La empresa consultora, que ha desarrollado el presente proyecto, lo entregará a la empresa cliente bajo las condiciones generales ya formuladas, debiendo añadirse las siguientes condiciones particulares:

1. La propiedad intelectual de los procesos descritos y analizados en el presente trabajo, pertenece por entero a la empresa consultora representada por el Ingeniero Director del Proyecto.

2. La empresa consultora se reserva el derecho a la utilización total o parcial de los resultados de la investigación realizada para desarrollar el siguiente proyecto, bien para su publicación o bien para su uso en trabajos o proyectos posteriores, para la misma empresa cliente o para otra.

3. Cualquier tipo de reproducción aparte de las reseñadas en las condiciones generales, bien sea para uso particular de la empresa cliente, o para cualquier otra aplicación, contará con autorización expresa y por escrito del Ingeniero Director del Proyecto, que actuará en representación de la empresa consultora.

4. En la autorización se ha de hacer constar la aplicación a que se destinan sus reproducciones así como su cantidad.

5. En todas las reproducciones se indicará su procedencia, explicitando el nombre del proyecto, nombre del Ingeniero Director y de la empresa consultora.

6. Si el proyecto pasa la etapa de desarrollo, cualquier modificación que se realice sobre él, deberá ser notificada al Ingeniero Director del Proyecto y a criterio de éste, la empresa consultora decidirá aceptar o no la modificación propuesta.

7. Si la modificación se acepta, la empresa consultora se hará responsable al mismo nivel que el proyecto inicial del que resulta el añadirla.

8. Si la modificación no es aceptada, por el contrario, la empresa consultora declinará toda responsabilidad que se derive de la aplicación o influencia de la misma.

9. Si la empresa cliente decide desarrollar industrialmente uno o varios productos en los que resulte parcial o totalmente aplicable el estudio de este proyecto, deberá comunicarlo a la empresa consultora.

10. La empresa consultora no se responsabiliza de los efectos laterales que se puedan producir en el momento en que se utilice la herramienta objeto del presente proyecto para la realización de otras aplicaciones.

11. La empresa consultora tendrá prioridad respecto a otras en la elaboración de los proyectos auxiliares que fuese necesario desarrollar para dicha aplicación industrial, siempre que no haga explícita renuncia a este hecho. En este caso, deberá autorizar expresamente los proyectos presentados por otros.

12. El Ingeniero Director del presente proyecto, será el responsable de la dirección de la aplicación industrial siempre que la empresa consultora lo estime oportuno. En caso contrario, la persona designada deberá contar con la autorización del mismo, quien delegará en él las responsabilidades que ostente.